



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

MĚŘENÍ RYCHLOSTI S POUŽITÍM RADARU

SPEED MEASUREMENT USING RADAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ ANDRLA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2016

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2015/2016

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Andrla Jiří**

Obor: Informační technologie

Téma: **Měření rychlosti s použitím radaru**
Speed Measurement Using Radar

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu a s metodami pro odhad rychlosti.
2. Po dohodě vytipujte algoritmus vhodný pro extrakci informace o rychlosti z radarových dat.
3. Navrhněte či zvolte metodu, která na základě extrahovaných informací umožní změřit rychlost projíždějících automobilů.
4. Implementujte zvolenou metodu.
5. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném HW. Na těchto datech proveďte sérii vhodných testů pro zjištění výkonnosti a spolehlivosti systému.
6. Diskutujte dosažené výsledky a navrhněte možné pokračování práce.

Literatura:

- M. Skolnik: Radar Handbook, 3rd edition, McGraw-Hill Professional, 2008
- M. Skolnik: Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Science, 3rd edition, 2002
- M. A. Richards: Fundamentals of Radar Signal Processing, 1st edition, McGraw-Hill, 2005

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Maršík Lukáš, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2015

Datum odevzdání: 18. května 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
602 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a implementovat program, který měří rychlost vozidel snímaných radarem s korekcí založenou na úhlu měření. Program je nejprve navržen a implementován v programu Matlab, implementace je poté přenesena také do jazyka C++. Tento program z radarových dat, zaznamenaných na CW radar, detekuje pohybující se dopravní prostředky, vypočítá jejich rychlost s pomocí korekce na základě úhlu a tyto údaje uloží do statistiky. Práce je vypracovávána kvůli zpracování problematiky korekce rychlosti na základě úhlu, protože s touto technikou by mělo být dosaženo přesnějších výsledků než bez ní. Výsledek této práce může být zajímavý pro všechny aplikace a systémy, které mohou používat měření radarem pod úhlem.

Abstract

The principal goal of this bachelor thesis is to design a program in the Matlab programming language that measures the speed of vehicles scanned by a radar. In this thesis, the program is also implemented in the C++ programming language. The designed software detects moving vehicles in sets of data obtained from a CW radar. For each of these vehicles, their speed is computed with respect to the angle of their motion to the orientation of the measuring device. In the end, overall statistics are generated from the data gained. The thesis solves the problems of correction of the speed measurement based on the measuring angle. This technique should provide better results than other classical methods without the correction. The outcome of this thesis can be interesting for every application or system that uses speed measurement with a radar under different angles.

Klíčová slova

Radar, Radar s kontinuální vlnou, kosinusový faktor, korekce měření rychlosti na základě úhlu, Rychlá Furierova transformace, detekce objektu

Keywords

Radar, Continuous wave radar, cosinus factor, correction of the speed measurement based on the measuring angle, Fast Furier transform, object detection

Citace

ANDRLA, Jiří. *Měření rychlosti s použitím radaru*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Maršík Lukáš.

Měření rychlosti s použitím radaru

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jiří Andrla
18. května 2016

Poděkování

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maršíkovi za věnovaný čas při seznamování s principy radarů, pomoci s měřením dat, poskytnutou odbornou pomoc a nasměrování při řešení této práce.

© Jiří Andrla, 2016.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod	2
2 Radary	4
2.1 Elektromagnetická vlna	4
2.2 Frekvenční pásma	4
2.3 Dopplerův jev	5
2.4 Princip Radaru	6
2.5 Základní části radaru	6
2.6 Rozdělení radarů	8
2.7 Zjištění úhlu	9
2.8 Radar K-MC4	10
3 Zpracování radarového signálu	13
3.1 Měření	13
3.2 Vzorkování a uložení dat	13
3.3 Předzpracování signálů	14
3.4 Rychlá diskrétní Fourierova transformace (FFT)	16
3.5 Zeropadding	16
3.6 Frekvenční spektrum a jeho analýza	18
3.7 Detekce objektu	21
4 Implementace v C++	27
5 Závěr	28
Literatura	29
Přílohy	30
Seznam příloh	31
A Ukázky grafů, znázorňujících postupné zpracování radarového signálu	32
B Grafy srovnávající použití zeropaddingu	34
B.1 Zeropadding pro 512 vzorků	35
B.2 Zeropadding pro 256 vzorků	36

Kapitola 1

Úvod

Měření rychlosti s použitím radaru je dlouhou dobu známá technologie, která však v posledních letech nachází využití v různých oblastech, především v automobilovém průmyslu. V České republice se za několik let v malých vesnicích i městech rozmístily radary, které zaznamenávají rychlost projíždějících dopravních prostředků a informují o dané rychlosti pomocí světelné tabule. Tato zařízení primárně slouží k zpomalování řidičů, kteří nedodrží maximální povolenou rychlost. Řídí se myšlenkou, že řidič, který je informován o porušení zákona - nedodržení povolené rychlosti, zpomalí na rychlost, za kterou nemůže být potrestán. Tato zařízení mohou zaznamenávat detekované dopravní prostředky do statistiky, ve které se mohou uchovávat informace o rychlosti a času průjezdu. Z těchto údajů lze pomocí analýzy zjistit kolik dopravních prostředků procentuálně porušuje maximální povolenou rychlost nebo rozdělit porušení rychlosti do skupin podle hodnoty o kolik kilometrů za hodinu byla rychlost překročena.

Radar však nemusí být použit jen pro měření rychlosti, z dat lze zjistit vytížení jednotlivých komunikací během dne, týdne nebo jiného sledovaného časového úseku, který je pro provozovatele radaru z jakéhokoliv důvodu důležitý. Výsledky takových analýz mohou pomoci při plánování objízdnych tras při rekonstrukci silničních komunikací nebo pro podložení důvodu pro výstavbu nových silničních tras a obchvatů měst.

Radary se převážně používají k měření u krajnice vozovky, kdy snímají vozovku pod úhlem do 10° , přitom se úhel zanedbává a dochází ke zkreslení údaje. Z tohoto důvodu se tato práce bude zabývat měřením rychlosti s použitím radaru, který bude měřit projíždějící dopravní prostředky po silničních komunikacích pod úhlem. Na základě úhlu bude rychlost přepočítána a bude získán přesnější údaj o rychlosti projíždějících dopravních prostředků. Měření radarem pod úhlem přináší i další výhodu. Radar může být při větších úhlech více vzdálen od okraje vozovky. Tato skutečnost pomáhá k nenápadnosti radaru a z toho vyplývající větší přesnosti měření ve smyslu, že řidič který nevidí radar nezpomaluje s ohledem na očekávané měření.

Radary, které se používají v dopravních aplikacích a systémech jsou převážně radary s kontinuální vlnou (CW radar), proto i tato práce bude popisovat řešení pro takový radar.

Tato práce si bere za cíl popsání problematiky měření radarem pod úhlem a následnou korekci vypočítané rychlosti s ohledem na úhel. Výsledek práce může být zajímavý pro nejrůznější aplikace a systémy, které mohou využít radar umístěný mimo osu pohybujících se objektů, které v daném případě chce snímat.

V následujících kapitolách bude postupně rozebrán princip radaru, popsány jeho části a uvedeny techniky pro předzpracování výstupních signálů radaru pro analýzu. Na základě frekvenční analýzy signálů bude ukázán způsob získání úhlu dopadu mikrovlny na radar,

který bude použit pro korekci rychlosti. Závěrečná část této práce se zabývá technikami detekce objektů z naměřených dat.

Kapitola 2

Radary

Technologie důležité pro vynalezení radaru se začali objevovat koncem 19. století. Jednalo se nejprve o zjištění chování elektromagnetické vlny, zkonstruování prvního vysílače elektromagnetických vln a poté i přijímače. Spojování těchto znalostí umožnilo vývoj zařízení dnes nazývaného radar. Termín radar vznikl z anglického Radio Detection And Ranging. [7]

2.1 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetická vlna je periodická změna elektromagnetického pole v prostoru a čase. Rychlost šíření její energie dosahuje ve vakuu rychlosti světla. Elektromagnetické vlny se liší vlnovými délkami a frekvencemi. [3] Tyto vlny dokázal v roce 1865 teoreticky popsat James Clerk Maxwell pomocí matematicko-fyzikálních rovnic, dnes známých jako Maxwellovy rovnice. [12] Elektromagnetické vlny jsou podle vlnových délek rozděleny do skupin. Radary využívají z elektromagnetického spektra mikrovlny nebo radiové vlny. Mikrovlny mají vlnovou délku od 1 mm po 1 m, to odpovídá frekvencím od 300 MHz po 300 GHz. Elektromagnetická vlna se dobře odráží od kovových předmětů a při tom zachovává zákon odrazu, kdy úhel dopadu k normále plochy rozhraní je roven úhlu odrazu k normále plochy rozhraní. Mikrovlny mají tu vlastnost, že dokážou některými materiály projít skrz (například dřevo, sádrokarton atd.)

2.2 Frekvenční pásma

Radary používají pro svojí činnost frekvence od stovek kHz až do 110 GHz. Toto frekvenční spektrum je rozdělováno do několika úseků, které tvoří pásma. Jednotlivá pásma jsou označena písmeny. Rozdělení frekvencí do pásem, jim odpovídajících vlnových délek a přiřazené označení ilustruje tabulka č. 2.2.

Radary, které využívají frekvence v nižších pásmech než UHF, jsou využívány například pro aplikace v meteorologii pro měření profilu oblačnosti. Frekvenční pásma UHF a L se využívají pro radary dlouhého dosahu. Velký dosah těchto radarů je umožněn malým útlumem signálu při šíření v atmosféře. Tato vlastnost umožňuje radarům, pracovat na vzdálenost několika set kilometrů. V pásmech S a C pracují radary středního dosahu. Frekvenční pásma X a Ka se používají pro radary se středním až malým dosahem. Pro tyto frekvence se začíná výrazněji projevovat atmosférický útlum, který má za následek zkrácení dosahu na stovky metrů až desítky kilometrů. V pásmu V a W se do velké míry projevuje

velký útlum elektromagnetické vlny v atmosféře. Radary v tomto pásmu se vyznačují velmi krátkým dosahem řádově jednotek až desítek metrů. [1]

frekvenční pásmo	frekvence f [GHz]	vlnová délka λ [cm]
VHF	a nižší menší než 0,3	větší než 100
UHF	0,3 až 1	100 až 30
L	1 až 2	30 až 15
S	2 až 4	15 až 7,5
C	4 až 8	7,5 až 3,75
X	8 až 12,5	3,75 až 2,4
Ku	12,5 až 18	2,4 až 1,7
K	18 až 26,5	1,7 až 1,1
Ka	26,5 až 40	1,1 až 0,75
V	40 až 75	0,75 až 0,4
W	75 až 110	0,4 až 0,27

Tabulka 2.1: Frekvenční pásma používaná pro činnost radarů

2.3 Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence přijímaného signálu vůči vyslanému signálu v závislosti na nenulové rychlosti zdroje nebo přijímače. Důsledkem přibližujícího se objektu k radaru je zachycení elektromagnetické vlny s vyšší frekvencí, než jaká je vysílací frekvence radaru. Pokud se objekt naopak od radaru vzdaluje, zachycená frekvence elektromagnetické vlny bude nižší. Tento jev zachycuje obrázek 2.1, λ značí vlnovou délku vyslané elektromagnetické vlny z radaru, λ' vlnovou délku elektromagnetické vlny odražené od objektu). Vztah pro výpočet frekvence je rovnice číslo 2.1.

$$f = f_0 * \frac{v}{v \pm v_{s,r}} \quad (2.1)$$

kde: f je frekvence přijímaného signálu, f_0 je frekvence vysílaného signálu, v je rychlost šíření vln v dané látce, $v_{s,r}$ je relativní radiální rychlost od zdroje (znaménko +) respektive ke zdroji (znaménko -). [11]

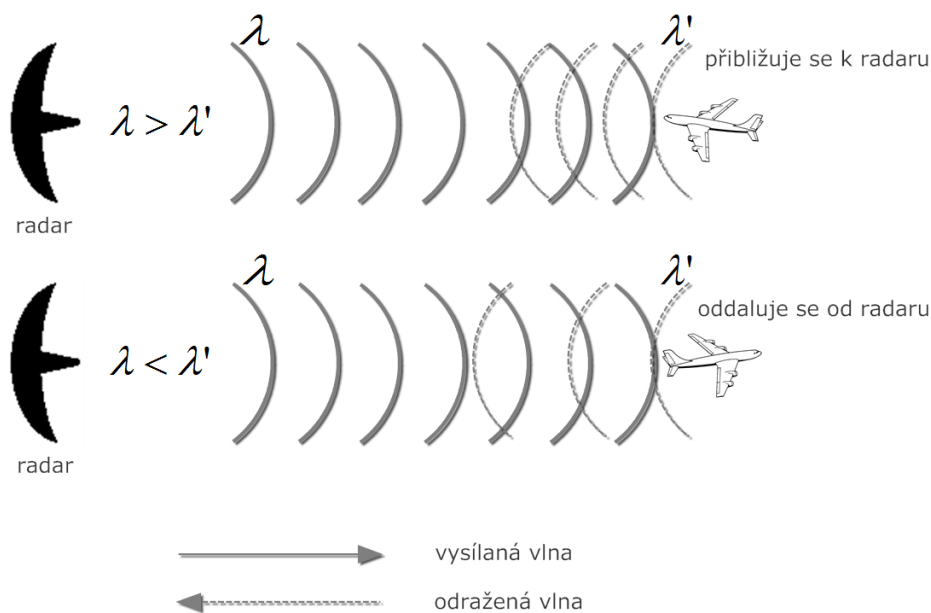
Pro výpočet rychlosti objektu vůči radaru lze využít vzorec 2.2.

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t} c \quad (2.2)$$

kde: v_r je relativní rychlost objektu, f_t vysílací kmitočet radaru a c je rychlost světla (299792458 m/s). [9]

Tím, že lze pomocí předešlého vzorečku vypočítat relativní rychlost (rychlost objektu vůči radaru), potřebujeme ještě vypočítat reálnou rychlost objektu. Tento výpočet můžeme provést dosazením do následující rovnice.

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \quad (2.3)$$



Obrázek 2.1: Dopplerovská změna frekvence [4]

kde: v_r je relativní rychlost objektu v m/s , λ je vlnová délka v metrech, v je absolutní rychlost v m/s a θ je úhel mezi směrem pohybujícího se objektu a odraženou mikrovlnou, která dopadla na přijímací antény radaru.

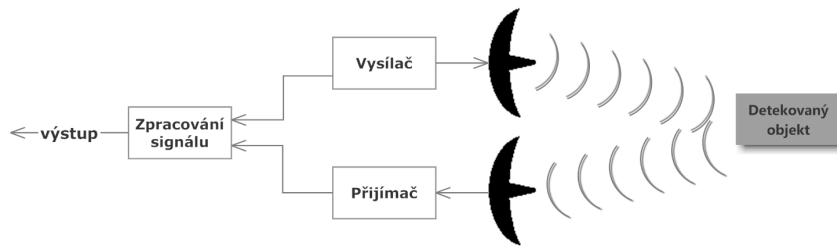
2.4 Princip Radaru

Radár je zařízení určené k detekci a lokalizaci objektů. Využívá vysílače elektromagnetických vln. Ten vysílá elektromagnetické vlny do prostoru, ve kterém se dále šíří. Předpokládá se, že elektromagnetická vlna narazí na překážku, od které se vlna odrazí zpět k radaru. Radar odražený signál zachytí na přijímací anténě, kde je vstupní elektromagnetická vlna přeměněna na elektrický signál. [6] Na základě rozdílu energií vyslaného a přijatého signálu a časové prodlevy, je určena rychlost objektu respektive jeho vzdálenost.

Dosah radaru ovlivňuje výkon radaru, jak silnou elektromagnetickou vlnu dokáže generovat a jaké frekvenční pásmo radar používá. Dále pak velikost objektu, který má být detekován, nejdůležitější vlastnosti pro odrazení elektromagnetických vln zpět k radaru jsou materiály, které byly použity na výrobu daného objektu, ale nejdůležitější věcí pro snadnou detekci je dostatek pravých úhlů na konstrukci objektu, které umožňují nejjednodušší odrazení vysílané elektromagnetické vlny zpět k radaru. Čím objekt splňuje více tyto parametry, tím je pro radar lépe odhalitelný. Technologie stealth americké armády se snaží u svých letadel, vrtulníků i lodí tyto jevy ze svých konstrukcí odstranit. Převážně se snaží odstranit pravé úhly z povrchu, dále používají materiály a speciální barvy, které hůře odráží mikrovlny nebo je pohlcují.

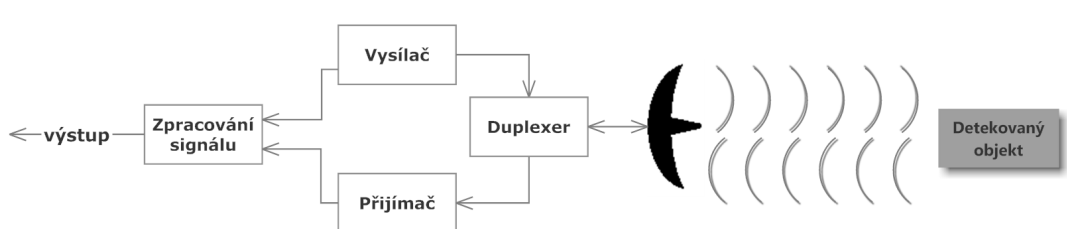
2.5 Základní části radaru

Z principu radaru vyplývají tyto části radaru:



Obrázek 2.2: Blokové schéma radaru

- Vysílač – Úkolem vysílače je vhodné vytvoření elektromagnetické vlny a její následné vyslání s předem daným výkonem.
- Anténa – Na kvalitě antény závisí dosah, citlivost a směrové rozlišení radaru. Radary obecně používají vysoce směrové antény, které jim umožňují kontrolovat směr kam se bude mikrovlna vysílat a z jakého směru byla elektromagnetická vlna zachycena. Z nastavení antény se také zjišťuje v výška detekovaného objektu. Velice často radar používá jen jednu anténu v tzv. duplexním režimu, to znamená, že anténa je k dispozici pro vysílání mikrovlny a poté pro příjem.
- Přijímač – Úkolem přijímače je zachytit odražený signál a zesílit jej na dostatečnou úroveň, aby mohl být dále zpracován. Síla zachyceného signálu závisí zejména na vzdálenosti objektu. Při zachycení odražené mikrovlny od blízkého objektu může být signál poměrně silný, naopak signály odražené od vzdálenějších objektů budou velmi slabé. Přijímač proto musí být schopný zpracovávat signály s velkým dynamickým rozsahem. Vzhledem ke zpracování velmi slabých signálů je od obvodů přijímače požadován malý šum.
- Blok zpracování signálu – V tomto bloku je prováděno vyhodnocení přijatého signálu na základě údajů o vysílaném signálu. Ze známých faktů o nastavení radaru jsou potenciálně detekovány objekty a je jim vypočítána rychlost a poloha. Při výpočtech se také musí počítat s určitými chybami a nežádoucími odrazy, které je potřeba při zpracování zanedbat.
- Duplexer – Je nedílnou součástí radarů, které používají jen jednu anténu. Stará se o to, aby vysílaný signál nepronikal do přijímače a naopak, aby přijímaný signál nepronikal do vysílače.



Obrázek 2.3: Blokové schéma radaru s jednou anténou

2.6 Rozdělení radarů

Rozdělení podle umístění antén

- Monostatický radar – má vysílací i přijímací anténu na stejném místě. Předpokládá se, že vysílaný signál se od objektu odrazí zpět k radaru. Toto řešení umožňuje kompaktní řešení radarů.
- Multistatický radar – má antény rozmístěné na různých místech. Tyto antény přijímají rozptýlený odražený signál a díky vzájemné synchronizaci vstupů, dokáží detekovat i objekt, který by monostatický radar nebyl schopen odhalit. Tento systém se používá pro detekci letadel stealth. Letadlo rozptyluje paprsek nebo ho odráží pryč od vysílacího radaru. Z tohoto důvodu čím více je vstupních antén na odlišných místech, tím více se zvyšuje šance objekt detekovat. Tento typ radarů je využíván především ve vojenském průmyslu.

Rozdělení podle délky vysílané elektromagnetické vlny

- Pulzní radary – Tyto radary vysílají energeticky silné pulzy po krátký čas a poté anténu přepnou z výstupního režimu do režimu vstupního a čekají na odraženou elektromagnetickou vlnu. Tyto radary využívají možnosti silného pulsu pro daleký dosah (obecně několik stovek kilometrů). [6] Jsou využívány ve vojenství a na letištích, pro detekci objektů v atmosféře, na vodě i na pevnině, nebo pro meteorologii.
- Radary s kontinuální vlnou (CW radar) – Stále vysílají elektromagnetické vlny. Z tohoto důvodu mají většinou jak vysílací tak přijímací anténu. Vlny mají typicky nižší energii než v případě pulzních radarů. To umožňuje vyrobit vysílač i přijímač z polovodičových součástek a umístit je společně s vstupní i výstupní anténou na jednu desku, díky čemuž má radar malé rozměry. Obvyčejný CW radar se také nazývá Dopplerovský radar, to jednoduše kvůli tomu, že pro zjišťování rychlosti objektů se rychlost získává z frekvenčního posunutí přijímané elektromagnetické vlny, neboli Dopplerovy frekvence. Nevýhoda oproti pulsním radarům je taková, že kvůli stálému vysílání elektromagnetické vlny nečekají na odražený impuls, CW radar tak nemůže jednoduše určit vzdálenost objektu. Tento typ radaru je využíván k měření rychlosti na silničních komunikacích, nebo pro aplikace s různým účelem sledování pohybu. [6]
- Radary s kontinuální vlnou využívající frekvenční modulaci (FM-CW radar) – je, jak už název napovídá, radar který vysílá neustále radarový signál, který v čase mění svou frekvenci nebo svoji fázi. Tyto změny se cyklicky opakují. Pro měření s těmito radary vyplývá, že se tyto změny musí zohlednit při výpočtech. FM-CW radary odstraňují největší nevýhodu CW radarů – nemožnost zjistit jak daleko se detekovaný objekt nachází, protože není možné zjistit po jakém časovém úseku se elektromagnetická vlna vrátila zpět k radaru. Při použití frekvenční modulace se elektromagnetická vlna vrátí vůči statickému objektu nezměněná, ale se zpožděním, tudíž bude mít menší nebo vyšší frekvenci (záleží zda právě probíhá modulace zvyšující frekvenci nebo snižující) oproti frekvenci právě vysílané elektromagnetické vlně. Kvůli požadavku na lineární změnu frekvence radaru musí mít radar nový blok, který bude tuto funkcionalitu zajišťovat, většinou je do radaru integrován napětím řízený oscilátor, na který je kladen důraz aby se choval co možná nejlineárněji. Žel většinou úplně lineární charakteristiku nemívá. Ta se pak musí dodatečně softwarově kompenzovat.

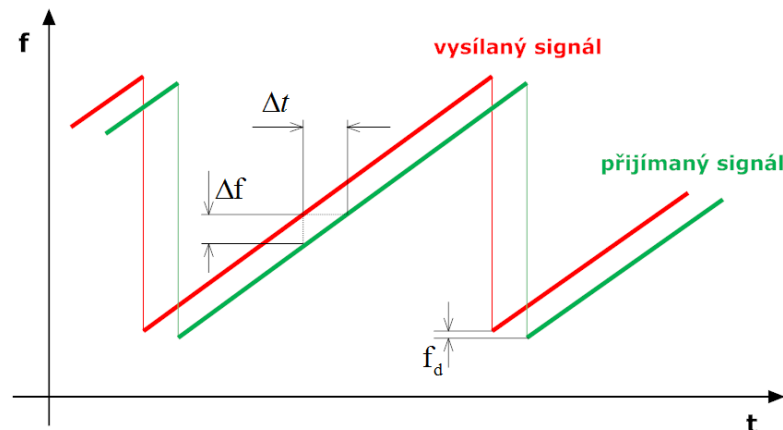
Pro další analýzu je potřebné aby radarové data byly nějakým způsobem rozděleny na úseky, kde se lineárně frekvence radaru zvyšuje nebo snižuje. Tyto úseky budou cyklicky generovány. Informace o započítí další iterace cyklu musí být zaznamenána i do výstupního signálu, určeného pro další zpracování. Měření vzdálenosti se provádí na základě porovnání frekvence přijatého signálu s frekvencí vysílaného signálu. Pokud se objekt pohybuje, není frekvence posunutá jen o zpoždění, se kterým se signál dostane zpět k radaru, ale i o dopplerovskou frekvenci. Dopplerovská frekvence buď posunutí zvýší nebo sníží.

$$R = \frac{c_0 * |\Delta t|}{2} = \frac{c_0 * |\Delta f|}{2 * (df/dt)} \quad (2.4)$$

kde: R je vzdálenost objektu, c_0 je rychlost světla ve vaku, Δt je časové zpoždění, Δf je frekvenční rozdíl mezi vysílanou a přijímanou frekvencí, df/dt je frekvenční posun za jednotku času.

Výhody FM-CW radaru:

- přesné měření vzdálenosti od malých vzdáleností až po dosah radaru
- možnost současně měřit rychlost a vzdálenost
- výstup dat pro zpracování neobsahuje vysoké frekvence, jaké vysílá radar, ale rozdíl vysílané a přijímané, z toho vyplývá možnost nižší vzorkovací frekvence výstupního signálu.



Obrázek 2.4: Princip frekvenční modulace

2.7 Zjištění úhlu

Základní určení místa, kde se detekovaný objekt nachází, se provádí dle nasměrování přijímací antény radaru a předpokládá se, že objekt se nachází přibližně kolem osy radaru. Tento údaj, však nemusí být pro CW radary dostatečný a může způsobovat i zkreslení výpočtu rychlosti. Ke zkreslení dochází tak, že radar vysílá elektromagnetickou vlnu do prostoru v nějakém rozmezí. Toto rozmezí je dáno fyzikálními vlastnostmi vysílací antény. Typicky se elektromagnetická vlna nešíří jen po ose radaru, ale rozpětí je několik stupňů od

radarové osy. Když se elektromagnetická vlna odrazí zpět k radaru a objekt od kterého se vlna odrazila zpět se nenachází na ose radaru, není vypočítaná rychlost reálná, ale jedná se o rychlost relativní vůči radaru. Na základě zjištění úhlu se relativní rychlost dá přepočítat na rychlost reálnou. V praxi se tento úhel zanedbává.

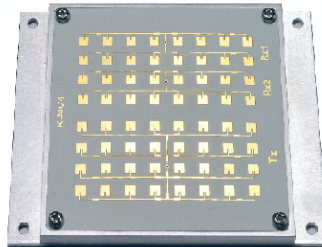
Radary které dokáží zjistit pod jakým úhlem elektromagnetická vlna dopadla na radar, musí mít dvě přijímací antény. To jim umožňuje porovnat fázi u dvou přijímaných signálů a ze vzájemného odečtení fází, zjistit úhel dopadu.

2.8 Radar K-MC4

Pro účel této práce byly sepsány požadavky na radar:

- CW radar – aby radar byl malý a vyhovoval pro účel měření rychlosti automobilů na komunikacích
- Měl dvě přijímací antény – aby bylo možné zjišťovat úhel přijaté elektromagnetické vlny
- Cenová dostupnost – aby cenová zátěž pro vyvíjený systém nebyla přehnaně vysoká
- Možnost zapůjčení radaru a podpůrného hardware i software pro sběr dat a testování

Na základě těchto kritérií byl vybrán radar K-MC4 od firmy Rfbeam Microwave GmbH, především kvůli tomu, že obsahuje dvě přijímací antény, na základě kterých lze zjistit úhel snímaného objektu a proto, že firma Camea tento radar vlastní a bylo možné si ho pro tuto práci vypůjčit.



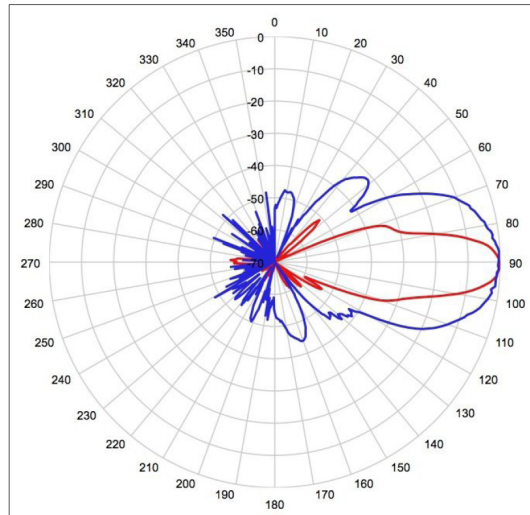
Obrázek 2.5: Radar K-MC4 [2]

Technická specifikace

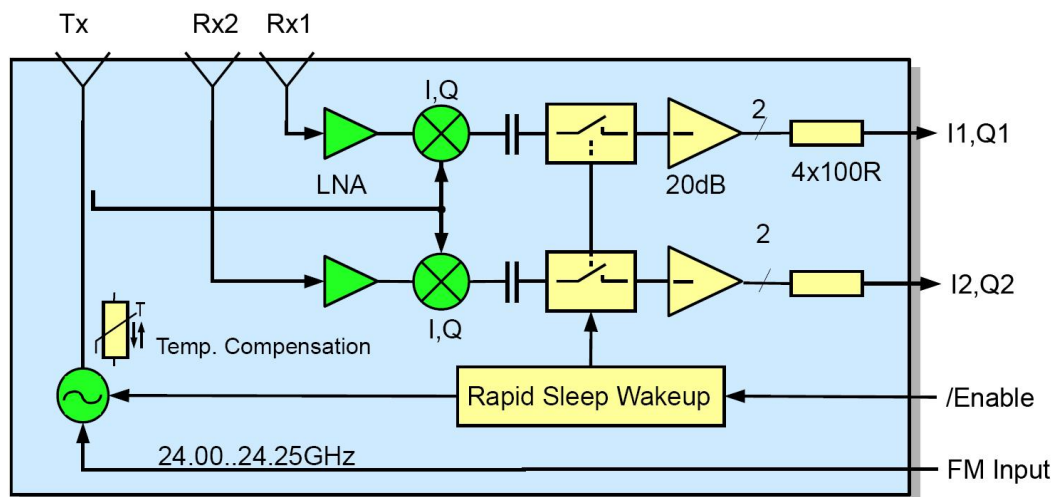
Radar vysílá mikrovlny z antény *Tx* o frekvenci v rozmezí 24,050 - 24,250 *GHz* (umožňuje lineární frekvenční modulaci v závislosti na čase, využívá se pro úlohy s měřením vzdálenosti [5]). Z vysílací antény se šíří mikrovlny $\pm 15^\circ$ od osy radaru v horizontální rovině a $\pm 6^\circ$ ve vertikální rovině. [2] (Ilustruje obrázek 2.6)

Tyto mikrovlny se od překážek odrazí zpět k radaru a jsou zachyceny na dvou přijímacích anténách *Rx1* a *Rx2*. Z přijímacích antén jsou signály zesíleny v zesilovači (low-noise amplifier (LNA)) [8]. Následuje směšovač, který odečte od přijatého signálu signál vysílaný. Tento výsledek je signál obsahující dopplerovské frekvence. Signál lze vyjádřit fázorem, neboli rotačním vektorem v komplexní rovině, rotujícím úhlovou rychlostí kolem počátku.

Projekce tohoto fázoru do reálné osy $x(t)$ vyjadřuje reálnou funkci, která se nazývá synfázní. Imaginární složka $y(t)$, posunutá oproti synfázní složce o $\frac{\pi}{2}$ je označena jako složka kvadraturní. [14] Synfázní složka odpovídá kanálu I a kvadraturní složka odpovídá kanálu Q [10]. Tyto kanály jsou zároveň výstupy radaru K-MC4. Jelikož má radar dvě antény, tak má čtyři výstupní kanály, pro první anténu ($Rx1$) $I1$ a $Q1$, pro druhou anténu ($Rx2$) $I2$ a $Q2$.



Obrázek 2.6: Vysílací rozsah antény Tx radaru K-MC4 [2]
modrou barvou je znázorněn vertikální rozsah a červenou barvou horizontální rozsah



Obrázek 2.7: Blokové schéma radaru [2]

Pohyb k radaru vs. od radaru

K zjištění zda se objekt pohybuje k radaru nebo od něj lze zjistit dvěma způsoby.

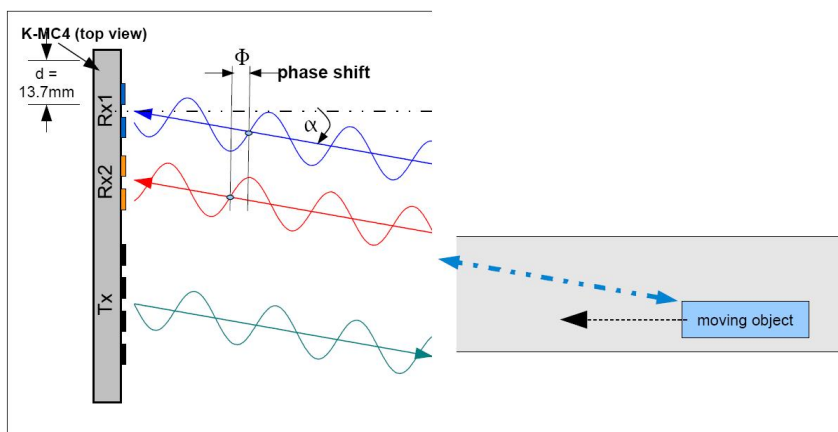
1. První způsob je spíše teoretický a v praxi se na něj nelze spoléhat. Vychází z faktu že pro pohyb k radaru je kvadrurní složka signálu oproti synfázni složce posunuta o $\frac{\pi}{2}$ a u pohybu od radaru je to přesně naopak. Takové to porovnávání lze použít jen u laboratorních testech, protože v reálných podmínkách se signál skládá z více frekvencí, které mohou obsahovat jak kladné tak záporné a posunutí synfázni a kvadrurní složky nemusí být zřetelné.
2. Spolehlivý postup jak zjistit, zda se objekt pohybuje k nebo od radaru, je signál dále analyzovat. Když bude signál převeden na frekvenční spektrum a z něho budou vybrány dominantní frekvence, tak ta frekvence, která bude mít největší zastoupení bude buď v kladné nebo záporné části frekvenčního spektra. Když bude v kladné, jedná se o objekt pohybující se k radaru, pokud záporná, objekt se pohybuje od radaru. Pokud je dominantní frekvence ve spektru kladná bude mít i svůj protějšek v záporné části spektra, který bude oproti jiným vyšší, ale nejedná se o pravou frekvenci, ale o parazitní jev.

Zjištění úhlu dopadu mikrovlny

Pro jednotlivé frekvence z frekvenčního spektra můžeme určit úhly, ze znalosti, že úhel dopadu mikrovlny je roven úhlu, který svírá fázor s reálnou osou neboli jeho fáze. Na základě této informace můžeme odvodit vzorec.

$$\gamma = \tan \frac{Q_n}{I_n} \quad (2.5)$$

kde: γ je fáze mikrovlny příslušné frekvence, Q_n je imaginární složka n-té frekvence z frekvenčního spektra a I_n je reálná složka n-té frekvence.



Obrázek 2.8: Rozdílná fáze na jednotlivých anténách [2]

Když získáme úhel pro stejnou frekvenci z obou antén, můžeme je od sebe odečíst a tím získáme Φ , které značí posunutí. Toto posunutí pak musíme vydělit konstantou radaru pro výpočet úhlu a výsledek je roven úhlu mezi vektorem dopadu mikrovlny na radar a osou radaru. (viz. 2.6)

$$\alpha = \frac{\Phi}{k} \quad (2.6)$$

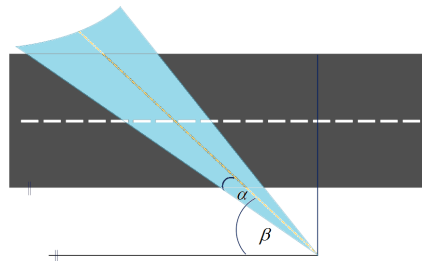
kde: k je konstanta, konkrétně pro radar K-MC4 6, 7. Viz obrázek 2.8.

Kapitola 3

Zpracování radarového signálu

3.1 Měření

Nejprve bylo zapotřebí naměřit data z reálného prostředí. Při měření bylo nejdůležitější aby se správně určil úhel, pod kterým radar snímal projíždějící automobily. Tento údaj ovlivňuje veškeré další zpracování naměřených dat. Při špatném určení vede k chybnému výpočtu rychlosti. Úhel byl naměřen od vodorovné přímky s okrajem vozovky a osou radaru. Tento úhel odpovídá úhlu, který svírá pohybující se objekt, když se nachází přímo na ose radaru. Ke korekci aktuálního úhlu je použito zjištění úhlu z frekvenčního spektra obou signálů, získaných z jednotlivých antén. Dle technické specifikace radar vysílá vlny v rozsahu $\pm 15^\circ$ od osy radaru. Pokud se automobil nachází v tomto rozmezí, měla by tato informace být obsažena ve frekvenčním spektru.



Obrázek 3.1: Umístění radaru

3.2 Vzorkování a uložení dat

O analogově číslicový převod a nastavování vzorkovací frekvence a jiných technik měření se samotný radar K-MC4 nestará, proto je potřeba vytvořit elektronický obvod, který tuto funkci zajistí. Pro tuto práci bylo použito zařízení firmy Camea, na kterém běží systém linux a aplikace běžící na této platformě se stará o správné vzorkování. Propojení mezi počítačem a zařízením je realizováno přes Ethernet a posíláním UDP paketů. Software vyvinutý k ovládání zařízení, který se spouští na PC umožňuje nastavení režimu radaru a také nastavení vzorkovací frekvence pro diskrétní reprezentaci signálů, kanálů $I1$, $Q1$, $I2$ a $Q2$. Vzorkování probíhá v dvanácti bitovém analogově-číslcovém převodníku na základě vzorkovací frekvence. Data jsou uložena v binární podobě v tomto účelu vyvinuté struktúře

souboru. Pro tuto úlohu byla použita vzorkovací frekvence 50000 Hz a neměnná frekvence radaru $24,150 \text{ GHz}$.

Jako radarový výstup získáváme nízkofrekvenční signály $I1$, $Q1$, $I2$ a $Q2$. Které jsou dále zpracovány a navzorkovány analogově-číslicovým převodníkem.

3.3 Předzpracování signálů

Postupně jsou načítána data ze souboru do rámců o vhodně zvolené délce. Délka takového rámce je vhodná určit dostatečně malá, aby signál bylo možno považovat za stacionární a nedošlo ke zkreslení jednotlivých frekvencí. Na druhé straně je požadavek na dostatečně velkou délku rámce, kvůli tomu, aby bylo možno přesně odhadnout požadované parametry. [13] Čím je délka rámce větší, tím je získána přesnější frekvence. To je dáno diskretním výpočtem dle vzorce 3.4 nebo 3.5, kde při delším rámci získáme více binů a tím na stejnou vzorkovací frekvenci více možných výsledků z čehož vyplývá, že nedojde ke zkreslení jednotlivých frekvencí.

Okénkové funkce

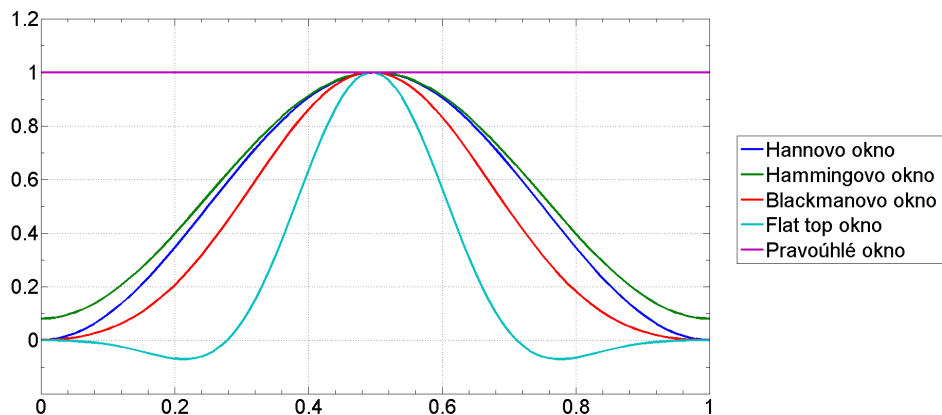
Výše popsaný postup rozdělení vzorků na jednotlivé rámce, lze pojmenovat i tak, že na vzorky aplikujeme tzn. Pravoúhlé okno, po kterém vznikne právě jeden rámeček, definice pravoúhlého okna:

$$w[n] = \begin{cases} 1 & \text{pro } 0 \leq n \leq l_{ram} - 1 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (3.1)$$

Existují i jiné okénkové funkce. V této práci bude využívána Hammingova okénková funkce. Ta je definována:

$$w[n] = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{l_{ram}-1} & \text{pro } 0 \leq n \leq l_{ram} - 1 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (3.2)$$

Pravoúhlé okno ve srovnání s Hammingovým oknem je selektivnější, ale spektrum znášší většími frekvenčními komponentami. [13] Obrázek č. 3.2 ukazuje nejznámější okénkové funkce.



Obrázek 3.2: Okénkové funkce

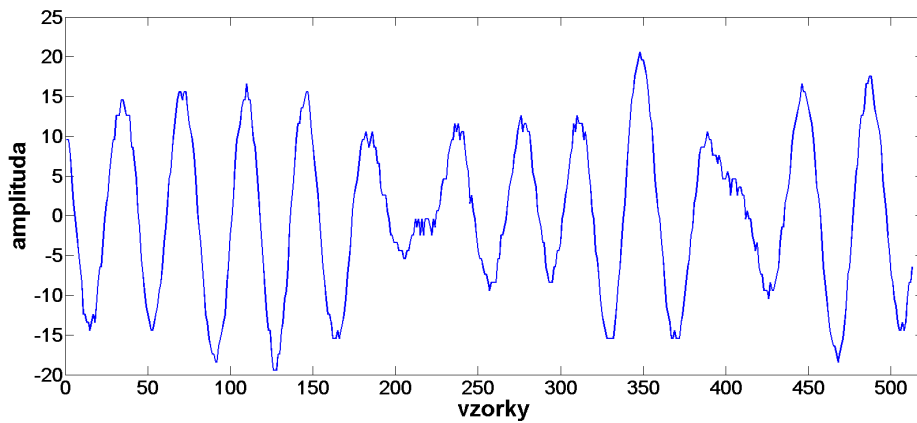
Stejnoseměrná složka

Stejnoseměrná složka se do signálu dostala tak, že analogově-číslicový převodník navzorkoval signál jako hodnoty v rozmezí 0 - 4096. Stejnoseměrná složka by negativně ovlivnila výsledky FFT, a protože nenese žádnou užitečnou informaci je dobré ji odstranit odečtením střední hodnoty. Tuto úpravu je dobré provést již před vynásobením rámcí okénkovou funkcí.

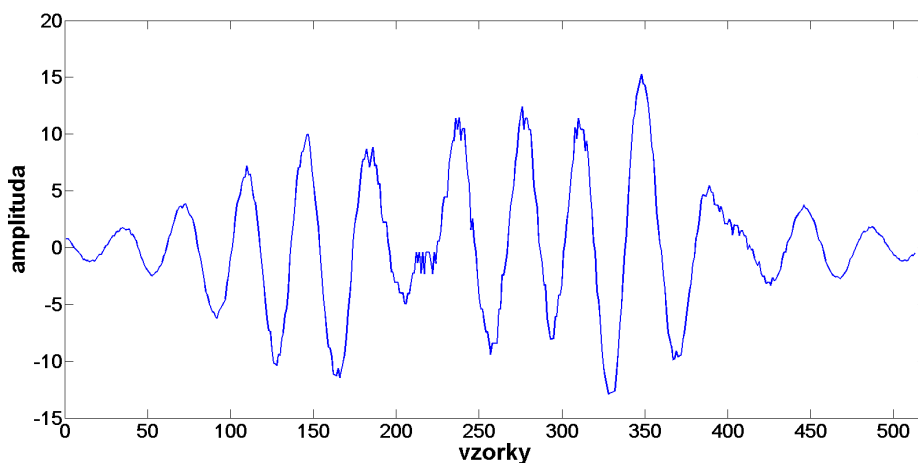
Mohou nastat dvě situace, v prvním případě se vypočítává střední hodnota v reálném čase, kdy neznáme budoucí hodnoty, pak musíme do jisté míry střední hodnotu odhadnout (typicky rekurzivně), nebo střední hodnotu určujeme, až známe celý signál a v takovém případě střední hodnotu vypočítáme jako: [13]

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} s[n] \quad (3.3)$$

kde: N je počet vzorků.



Obrázek 3.3: Reálná část radarového signálu



Obrázek 3.4: Reálná část signálu vynásobená Hammingovou funkcí

3.4 Rychlá diskretní Fourierova transformace (FFT)

Vzhledem k situaci, kdy většina informací důležitých pro zjišťování rychlosti je zakódována ve frekvenčních složkách (a jeho fázích) výstupního signálu, je nutné udělat frekvenční analýzu signálu. K tomuto účelu slouží např. metoda rychlá Fourierova transformace (FFT). [6] Fourierova Transformace je matematická operace, která převede nesinusovou funkci na řadu sinusových složek [15], reprezentující frekvenční spektrum. Z absolutní hodnoty vektoru komplexních čísel (vektor fázorů) získáme zastoupení jednotlivých frekvencí pro daný rámeček. Jednotlivé prvky vektoru neodpovídají skutečným frekvencím, jsou to tzv. biny. Ty musí být na frekvenci převedeny pomocí následujících vzorců.

$$f = bin * \frac{f_{vzorkovac}}{N} \quad (3.4)$$

$$f = (N - bin) * \frac{f_{vzorkovac}}{N} \quad (3.5)$$

kde: f je odpovídající frekvence daného binu, $f_{vzorkovac}$ je vzorkovací frekvence radarového signálu a N je počet vzorků. Bin je index do vektoru frekvenčního spektra. První vzorec je pro biny menší nebo rovny $N/2$ a druhý vzorec je pro biny větší nebo rovny $N/2$

Rozdíl v první a druhé polovině spektra je ve znaménku frekvence. Frekvence z první poloviny je kladná, objekt se pohybuje k radaru, v opačném případě od radaru.

Výslednou rychlost vypočítáme pomocí Dopplerova jevu, který byl popsán výše v podkapitole 2.3.

Pro potřeby této práce, je zapotřebí před výpočtem FFT, nejprve spojit kanály reprezentující reálné a imaginární části signálů do signálů skládajících se z komplexních čísel. Jelikož kanály $I1$, $I2$ reprezentují reálnou část signálu a $Q1$, $Q2$ imaginární část, existují jednoduché rovnice pro vytvoření komplexních signálů.

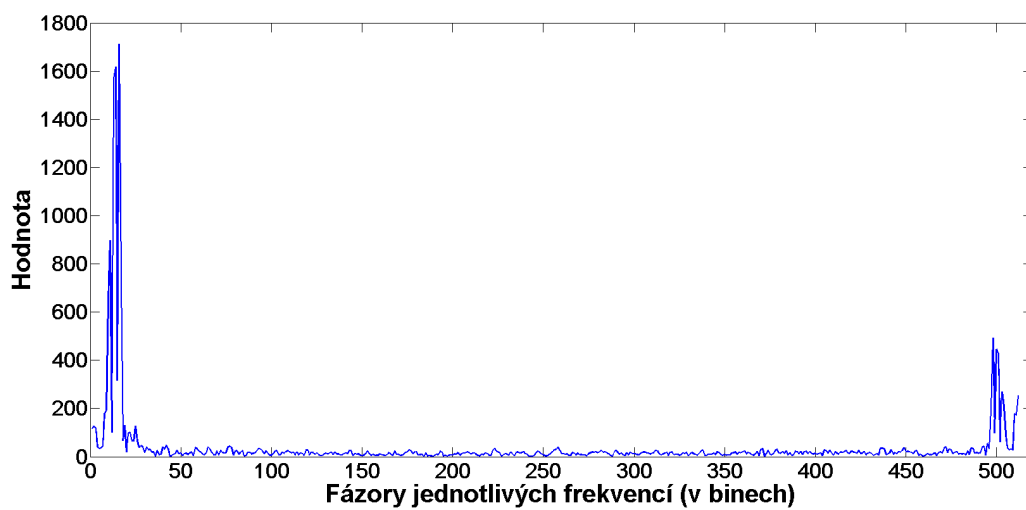
$$signal1 = I1 + jQ1 \quad (3.6)$$

$$signal2 = I2 + jQ2 \quad (3.7)$$

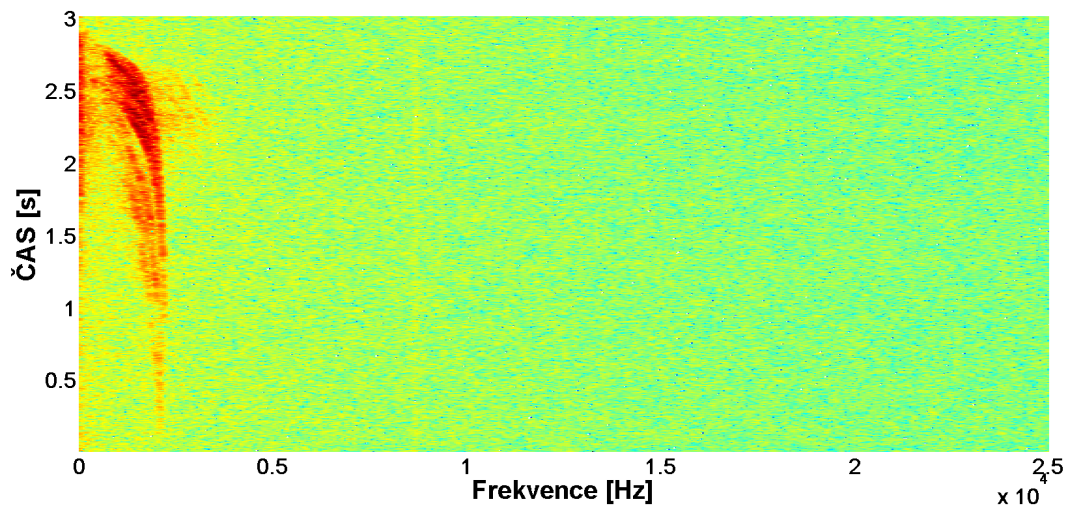
3.5 Zeropadding

Technika zeropadding se využívá pro zlepšení následného výpočtu frekvenčního spektra metodou FFT. Jelikož FFT má za výsledek frekvenční spektrum vstupního signálu v rozmezí 0 až $\pm \frac{f_{vzorkovac}}{2}$ a tyto dva intervaly jsou diskretně rozděleny na tolik částí, kolik vzorků tvoří rámeček, pro který počítáme FFT. Prakticky to znamená, že pro rámeček obsahující více vzorků dosahujeme vyšší přesnosti výpočtu frekvence i její fáze. Délka rámce se však nemůže prodlužovat neomezeně, protože by se nesplnila stacionární podmínka pro signál.

Technika zeropadding řeší problém s nedostatečným rozlišením frekvenčního spektra, ze kterého jsou pak získána zaokrouhlené frekvence. Metoda spočívá v prodloužení rámce o vzorky s hodnotou 0. Tímto bude dodržena podmínka pro stacionárnost signálu, protože se výpočet nezvýší o další vzorky ze signálu a zároveň získáme jemnější rozložení frekvenčního spektra, které nebude zkresleno, jelikož signál byl rozšířen o hodnoty 0. Rozdíly použití zeropaddingu jsou ukázány na grafech fázorů vypočítaných z frekvenčního spektra v příloze B.



Obrázek 3.5: Frekvenční spektrum



Obrázek 3.6: Kladná část spektrogramu průjezdu jednoho automobilu

Pro potřeby této práce bylo zjištěno, že nejvýhodnější kombinací délky vzorků a zeropaddingu je 512 vzorků s rozšířením pomocí zeropaddingu na 2048 vzorků. Při snaze o jemnější interval mezi získanými frekvencemi, se stává, že výstupy z FFT pro dominantní frekvence mohou být pro obě antény v odlišných bínách. V takovém případě je další zpracování nemožné. Délka rámce je vždy určena jako mocnina dvou, pro které je efektivní algoritmus FFT.

Rámec má tedy délku 512 vzorků. Program vytvoří čtyři rámce pro jednotlivé kanály a načte do nich data. Tyto data jsou dále upravovány, tak jak bylo popsáno v kapitole zpracování radarového signálu. Nejprve je odečtena stejnosměrná složka 3.3, pak je signál upraven vynásobením Hammingovým oknem 3.4 a následuje spojení kanálů do komplexního signálu.

3.6 Frekvenční spektrum a jeho analýza

Z komplexního signálu se frekvenční spektrum získá pomocí FFT. Pro najetí majoritních frekvencí je zapotřebí z jednotlivých frekvencí, obsažených ve frekvenčním spektru, vypočítat fázory. Ty určí jak moc jsou jednotlivé frekvence v signálu zastoupeny. Fázor je vypočítán, jako absolutní hodnota komplexního signálu, ta se vypočítá pomocí Pythagorovy věty z reálné (r) a imaginární (i) složky komplexního signálu dle následujícího vzorce.

$$abs = \sqrt{r^2 + i^2} \quad (3.8)$$

Prahování

Když jsou známy velikosti fázorů jednotlivých frekvencí je zapotřebí z nich vybrat takové, které budou zajímavé pro další analýzu. Jelikož frekvence, které jsou ve velké míře zastoupeny v signálu, mají velkou hodnotu fázoru a frekvence málo zastoupené mají fázory s malou hodnotou, je zapotřebí určit vhodný práh, jehož hodnota určí, které frekvence budou dále analyzovány. Tímto se odstraní z výpočtu rychlosti šum, který radar zaznamená. Ještě před tím, se musí najít vrcholy ve vektoru fázorů. Pro další analýzu budou vybrány frekvence které odpovídají vrcholům v fázorovém spektru a zároveň mají hodnotu vyšší než zvolený práh. Vektor fázorů s nalezenými vrcholy ukazuje obrázek číslo 3.5.

Jelikož se při výpočtu frekvenčního spektra používá technika zeropadding, teoreticky může nastat situace, kdy index vrcholu fázorů (bin) ve frekvenčním spektru první antény může být o jedničku posunutý vůči vrcholu fázorů z druhé antény. Pokud je detekována takováto situace, tento vrchol se dále nezpracovává, protože úhel z získaný z takto posunutých vrcholů by byl chybný. Chybný by byl z důvodu, že se pro výpočet úhlu berou fáze fázorů reprezentující danou frekvenci v daném stejném binu pro první i druhou anténu, pokud by byl bin různý, berou se pro výpočet dvě fáze, které spolu nesouvisejí a z tohoto důvodu je úhel takto vypočítaný chybný.

Výpočet úhlu

Pro jednotlivé frekvence jsou zjištěny úhly dle kapitoly 2.8. Z frekvenčního spektra je vybráno komplexní číslo odpovídající fázoru nalezeného jako vrchol v fázorovém spektru. Z tohoto čísla je vypočítán úhel pomocí funkce tangens.

$$uhel = \tan \frac{i}{r} \quad (3.9)$$

kde i je imaginární a r reálná složka komplexního čísla. Úhel od osy radaru je vypočítán jako rozdíl takto získaných úhlů z jednotlivých antén.

$$\Phi = \beta - \gamma \quad (3.10)$$

kde Φ je posunutí fází mezi oběma anténami radaru, β je úhel získaný z frekvence z první antény a γ je úhel získaný z frekvence z druhé antény.

Posunutí Φ může být mimo interval $\langle -\pi, \pi \rangle$, proto je nutné ho do tohoto intervalu převést a to přičtením 2π pro záporné úhly, které jsou menší než $-\pi$, nebo odečtením 2π pro kladné úhly, které jsou větší než π .

Na závěr je posunutí vyděleno konstantou radaru, která je v případě radaru K-mc4 6,7. Vzorec ??.

K úhlu α je potřeba připočíst úhel radaru k vozovce (δ). Tento úhel byl nastaven při instalaci radaru před měřením (viz. kapitola 3.1).

$$\theta = \alpha + \delta \quad (3.11)$$

Výpočet rychlosti

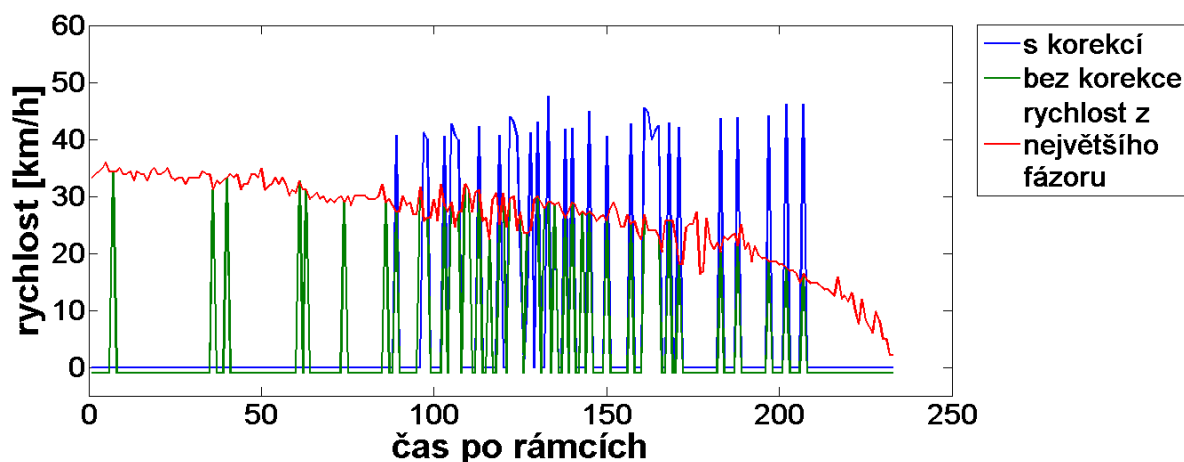
Když je z předcházejících výpočtů znám úhel, může být použit pro korekci rychlosti. Rychlost se vypočítá na základě dvou vzorců, jednoho na výpočet frekvence z frekvenčního spektra 3.4, nebo 3.5 a druhého na výpočet rychlosti. Oba sloučené vzorce vypadají následovně:

$$v_r = bin * \frac{f_v * c}{2 * f_r * N} \quad (3.12)$$

kde v_r je relativní rychlost (rychlost vůči radaru), f_v je vzorkovací frekvence, c je rychlost světla, f_r je frekvence mikrovln vysílaných radarem a N je počet prvků frekvenčního spektra.

Reálná rychlost (v) se získá ze vzorce:

$$v = \frac{v_r}{\cos \theta} \quad (3.13)$$



Obrázek 3.7: Ukázka výpočtu rychlosti s korekcí a bez korekce

Obrázek 3.7 ukazuje hodnoty pro odlišně spočítané rychlosti. Nahrávka dat, z které jsou rychlosti vypočítány, proběhla mezi budovami Fakulty informačních technologií na ulici Božetěchové. Červeně jsou ukázány hodnoty rychlosti bez korekce úhlu, vypočítané jen z největších fázorů v každém rámci. Zeleně je zobrazena rychlost, také bez korekce úhlu, ale jen v případě, pokud dosahuje fázor hodnoty větší než práh. Můžeme si všimnout, že oproti rychlosti vypočítané jen z maxim fázorů, je vypočítávána výrazně méně. To můžeme přisoudit především příliš vysokému práhu a také tomu, že než se automobil dostane do přímého dosahu radaru, je zaznamenán jen mikrovlnami s vícenásobnými odrazy. Tyto mikrovlny se v tomto konkrétním případě zaznamenají proto, protože se odrazí od budovy nebo zaparkovaných automobilů zpět k radaru. Jejich síla ovšem je zesláblá vlivem vícenásobného odrazu a hodnota frekvenčního vrcholu nepřekoná ve většině případů zvolený práh.

Modře je znázorněna rychlost vypočítaná s korekcí úhlu a jen pokud frekvence z obou přijímacích antén splňují podmínky:

- maximální fázor je větší než práh
- maximální fázor je ve stejném binu v obou spektrech z každé antény
- úhel dopadu mikrovlny na radar je v rozmezí $\pm 15^\circ$

Zpřesnění výpočtu rychlosti

V každém rámci jsou vypočítány rychlosti s korekcí úhlu pro dominantní frekvence, které jsou zjištěny na základě velikosti fázorů v frekvenčním spektru, převyšující zvolený práh. Složitá situace nastává, pokud je vypočítáno více rychlostí (rámec obsahuje více dominantních frekvencí). Můžou nastat dva případy, které mohou být vzájemně kombinovány:

1. dominantní frekvence v rámci odpovídají jedné rychlosti
2. dominantní frekvence patří různým objektům pohybujících se v dosahu radaru

První případ může nastat kvůli měření rychlosti pod úhlem, kdy automobil sice má rychlost stále stejnou, ale radar ji vnímá v každém okamžiku jinak. To kvůli změně úhlu pod kterým se automobil pohybuje vůči radaru. Z tohoto důvodu může mít více odrazů od různých částí automobilu např. přední nárazník, klika dveří nebo sloupek různé frekvence, které avšak po přepočítání na absolutní rychlost by měly být stejné. Druhý případ popisuje komplikovanější jev, který je však v reálném provozu typický. Jedná se o situaci, kdy se v dosahu radaru pohybuje více objektů. Pokud mají objekty rozdílnou rychlost není problém je od sebe rozeznat. Jiná situace nastává pokud mají velice podobnou nebo dokonce stejnou rychlost. Pro takové situace se běžně využívá FM-CW radar, který díky změně frekvence je schopen určit vzdálenost, kde se objekt nachází a z dat vypočítat zda se jedná o jeden nebo více objektů. Tato práce si však klade za cíl měřit rychlost s obyčejným CW radarem a proto je potřeba zajistit detekci objektů pro odlišení vypočítaných dat jednotlivých rychlostí.

Když budou jednotlivé rychlosti, které jsou vypočítány jak během každého rámce, tak i rámců po sobě jdoucích, přiřazeny detekovaným objektům, pak se z nich bude moci vypočítat výsledná rychlost objektu. Tento výpočet se může provést různými metodami. Nejjednodušší je aplikovat na tento seznam rychlostí aritmetický průměr a z něho získat výslednou rychlost. Složitějším způsobem, lze jednotlivým rychlostem přiřadit váhu na základě velikosti fázoru z frekvenčního spektra a následně provést výpočet váženého průměru.

3.7 Detekce objektu

Do této chvíle bylo v práci řešeno získání jedné zpřesněné rychlosti, pomocí úhlu. V praxi se od projíždějícího automobilu získávají frekvenční spektra s více vrcholy, které jsou způsobeny odrazy mikrovln od různých částí automobilu pod různým úhlem. Z těchto vrcholů si pak může algoritmus vybrat ty, které splňují všechny podmínky pro nezkreslenou frekvenci. V první řadě je to potvrzení, že vrchol se nachází ve spektru z každé antény, a že mikrovlna dopadla na radar pod očekávaným úhlem, to znamená, že se nejedná o odraz od nejrůznějších překážek, které mohou stát v šíření mikrovln v cestě. Více vrcholů ve spektru se projevuje typicky až se maska automobilu dostane za osu radaru, pak se mikrovlny odrážejí kromě masky postupně i od kliky spolujezdce a kliky zadních dveří, popřípadě jiných hran, které umožňují odraz mikrovlny zpět k radaru. Více odrazů pod různými úhly je přínosem a umožňuje to zpřesnit měření rychlosti automobilu. Díky získání více vrcholů a tím pádem více frekvencí se může pro každou vypočítat rychlost a provést korekce na základě úhlu. Díky tomu získáme více přesných dat o rychlosti. Když je poté všechny zprůměrujeme, dostaneme přijatelně přesnou rychlost.

Lineární frekvenční modulace (LFM)

Standardní technika pro detekci objektů je založena na technice zjišťování vzdálenosti. Tato technika používá měření pomocí lineární frekvenční modulace, při které se v průběhu měření mění frekvence a očekává se, že tato změna se projeví na frekvenci zachycené mikrovlny. Z této informace se pak získá vzdálenost objektu, od kterého se mikrovlna odrazila.

Detekce na základě rozdílných rychlostí a více vrcholů ve frekvenčním spektru

Myšlenka této detekce spočívá v mínění, že více automobilů pohybujících se v prostoru, kam radar vysílá mikrovlny, zanechá ve frekvenčním spektru více vysokých frekvenčních vrcholů. Pro ně se musí zvolit vhodně vysoký práh, který zaručí, že se bude jednat opravdu o samostatný objekt a ne jen o další část stejného automobilu. Ostatní frekvenční vrcholy jsou přepočítány na rychlost s korekcí úhlu a pokud splňují všechny podmínky, které byly zmiňovány výše, jsou přiřazeny k již detekovaným objektům.

Na začátku jsou načteny čtyři rámce radarových dat o velikosti 512 vzorků. Tyto rámce obsahují reálná čísla jeden pro kanál $I1$, druhý pro kanál $Q1$, třetí pro $I2$ a čtvrtý pro $Q2$. Pak dle kapitoly 3.2 je odstraněna stejnosměrná složka, rámec je vynásoben Hammingovým oknem a jsou vytvořeny dva komplexní signály, které reprezentují signály z antén $Rx1$ a $Rx2$. Tyto signály jsou dle zeropaddingu rozšířeny nulami na délku 1024 vzorků. Následuje výpočet frekvenčního spektra pomocí FFT. Z frekvenčního spektra jsou pomocí Pythagorovy věty z každého komplexního čísla vypočítány fázory, které se dále prohledávají funkcí pro nalezení frekvenčních vrcholů. Z těchto vrcholů jsou získány dva vektory vrcholů. První z nich obsahuje vrcholy považované za méně dominantní odrazy od objektu. Z praktického hlediska nejsou tyto vrcholy dostatečně velké na to, aby byly považovány za hlavní odraz reprezentující jeden konkrétní objekt, ale jako podpůrnou informaci o již detekovaném objektu. Druhý vektor vrcholů obsahuje informaci kolik objektů se nachází ve frekvenčním spektru, které musí mít vrchol vyšší než práh pro detekci objektu. Tento práh detekce byl zvolen tak, aby v případě výskytu této, nebo vyšší hodnoty v fázorovém spektru, bylo jednoznačné, že se jedná o nejvíce zastoupenou frekvenci, přijímanou od objektu. Pokud je detekováno více objektů než v je aktuální počet, je provedeno vytipování, jaká rychlost může odpovídat novému objektu. Vytipování se provádí pomocí nalezení rychlosti, která

není podobná s rychlostmi již detekovaných objektů. Na začátku jsou vybrány poslední nalezené rychlosti jednotlivých detekovaných objektů a ty jsou porovnávány s nově vypočítanými rychlostmi z aktuálně zpracovávaného rámce. Pokud je nalezena shoda, je nová rychlost odstraněná z možných adeptů na rychlost nového objektu. Pokud jsou porovnány všechny rychlosti a není ponechána jen jedna rychlost, je celý proces porovnávání rychlostí opakován s tolerancí. Tato tolerance každou iteraci roste. Předpokládá se, že zůstane jen jediná rychlost a ta patří nově se objevenému objektu. O detekovaném objektu tento algoritmus potřebuje mít informaci, jak dlouho se bude vyskytovat v radarovém rozsahu. Tato informace je důležitá, protože určuje, kdy už objekt není v oblasti kam radar vysílá mikrovlny a potenciálně detekované velké fázory interpretuje jako nový objekt. V tomto algoritmu, je tato přibližná informace získána z rychlosti automobilu na začátku detekce a zadané vzdálenosti radaru od středu vozovky. Informace o vzdálenosti od středu vozovky spolu s údajem o úhlu jsou jediné dvě konstanty, které musí být algoritmu zadány před samotným analyzováním dat.

Pro získání informace, jak přibližně dlouho bude objekt v dosahu radaru musíme použít následující vorce. Situaci se snaží nastínit obrázek 3.8. Stranu c vypočítáme pomocí vzorce:

$$c = \frac{\text{vzdlenost}}{\cos(90 - (\alpha - 15))} \quad (3.14)$$

kde α je myšlen úhel, který svírá osa radaru s okrajem vozovky. V tomto případě je α rovna 45° .

Pro výpočet délky potřebujeme:

- sinovu větu:

$$dlka = \frac{c * \sin(30)}{\sin(\alpha - 15)} \quad (3.15)$$

kde od α je odečteno 15° , protože rozsah od osy radaru je 15° . K délce je nutné přičíst délku vozidla, která je přibližně určena na 5 metrů.

- čas, který vozidlo potřebuje na projetí délky lze vypočítat ze vzorce:

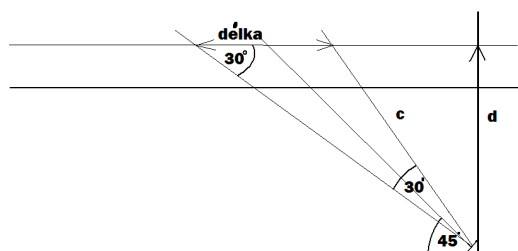
$$t = \frac{dlka}{v} \quad (3.16)$$

- čas, který uběhne během jednoho rámce:

$$t_1 = \frac{512}{50000} 0.5 \quad (3.17)$$

Násobené 0.5, z důvodu překrytí rámců.

Po potenciální detekci nového objektu jsou zpracovány všechny frekvenční vrcholy ve fázorovém spektru větší než detekční práh. Pokud jsou v signálech z obou dvou antén nalezeny vrcholy pod stejným binem a úhel splňuje podmínku $\pm 15^\circ$ od osy radaru, pak je pro rychlost vyhledán objekt s nejpodobnější poslední rychlostí. Jelikož platí, že každá frekvence patří jinému objektu, tak jakmile je jedna rychlost již přidělena, dalšímu objektu přidělena být nemůže.



Obrázek 3.8: Ukázka situace

Obdobně jsou předělovány rychlosti detekovaným objektům, které mají fázorové vrcholy nižší než detekční práh, ale vyšší než druhý práh. Jen už neplatí podmínka, že jednomu objektu nemůže být přiřazeno více rychlostí.

Když byla tato metoda naimplementována, byla otestována na naměřených datech. Při těchto testech bylo zjištěno, že pro situace, kdy se v rozsahu radaru pohybuje jen jeden automobil, funguje správně, ale v případě výskytu více pohybujících se objektů neprobíhá detekce s následným rozdělováním rychlostí korektně. Důvod tohoto stavu je, že nelze stanovit konstantní práh pro detekci objektů. Síla mikrovlny, která se odráží od automobilu zpět k radaru, závisí na vzdálenosti, kterou musí urazit. Tento fakt ovlivňuje velikost jednotlivých fázorů ve frekvenčním spektru do takové míry, že detekci na základě velikosti frekvenčního vrcholu nelze spolehlivě používat.

Metoda hledání shluků

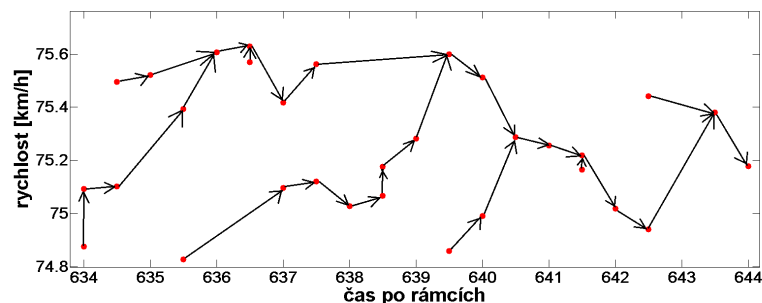
Tato metoda používá stejné načítání signálů do rámců a následné předzpracování jako metoda rozlišování objektů na základě rozdílných rychlostí a více vrcholů ve frekvenčním spektru. Pro každý frekvenční vrchol ve frekvenčním spektru, který splňuje podmínky popsané v kapitole 3.6 je počítána frekvence, úhel dopadu mikrovlny na radar a následně je počítána absolutní rychlost. Tímto způsobem jsou vypočítány veškeré rychlosti, které splní podmínku pro analyzování jak z jednoho rámcu tak z dalších rámců po sobě jdoucích. Tyto rychlosti jsou postupně ukládány do seznamu, ve kterém jsou mimo samotnou rychlost uloženy i informace o číslu rámcu, z jakého rychlost pochází a o velikosti fázoru, z jakého byla rychlost vypočítána, která slouží pro výpočet váženého průměru rychlosti již detekovaného objektu. Seznam rychlostí je vytvářen do takové doby, dokud je aktivní analýza jednotlivých rychlostí v rámci s časovou tolerancí několik rámců. V praxi to znamená, že seznam bude uzavřen až vyprší limit, kdy nebyl během např. dvaceti po sobě jdoucích rámců analyzován žádný frekvenční vrchol. Tímto vrcholem se rozumí žádný frekvenční vrchol, který by byl větší než zvolený práh. To znamená, že i když se ve frekvenčním spektru nachází frekvenční vrchol, který nebude z nějakého důvodu dále analyzován (neodpovídající vrchol v obou spektrech nebo úhel dopadu větší než $\pm 15^\circ$) algoritmus tento rámeček vyhodnocuje tak, že je z něho frekvenční vrchol analyzován a rámeček se nezapočítává do neaktivních rámců. Tento postup rozdělování rychlostí do časových bloků kdy jsou ukládány rychlosti do seznamu vede k efektivnější další analýze rychlostí. Jedná se o to, že algoritmus dále zpracovává méně dat než kdyby hledal objekty nad všemi rychlostmi získanými z celého datového toku dat, pro které se zpracovává statistika.

Pokud algoritmus zjistil, že dostatečnou dobu se v dosahu radaru neobjevil žádný pohybující se objekt, celý seznam rychlostí přebírá další část algoritmu, která se snaží nalézt shluky rychlostí. Shluk je charakterizován tak, že rychlosti s podobnou hodnotou a zrna-

menané v podobném čase tvoří shluk. Problém je, že dopředu není známo kolik shluků se v seznamu rychlostí vyskytuje. Z tohoto důvodu nebylo použito existujících algoritmů pro nalezení shluků, ale byla vytvořena metoda pro účel této práce a pojmenována x-means.

X-means

Tato metoda na začátku své činnosti dostane seznam rychlostí i s číslem, kterému rámci odpovídají. Rychlosti jsou seřazené podle času a jednomu časovému okamžiku může náležet více rychlostí. Algoritmus pracuje tak, že v prvním průchodu hledá nejbližší dvojice jednotlivých rychlostí, ale jen ve směru časové osy a s omezením maximální vzdálenosti (omezení časové prodlevy mezi zaznamenáním jednotlivých rychlostí a také omezení rozdílu hodnot rychlostí). Pokud existuje takový záznam rychlosti, který splňuje tyto podmínky je vytvořena vazba mezi nimi, která může být popsána orientovaným grafem, kde vrcholy symbolizují jednotlivé rychlosti a hrany vazby mezi nimi orientované podle času. Pokud Vrchol nemá dostatečně blízko další vrchol, jedná se o vrchol koncový.



Obrázek 3.9: Ukázka orientovaného grafu rychlostí

V druhém průchodu seznamu rychlostí se vytváří dílčí seznamy jednotlivých shluků. Postupně se znovu procházejí vrcholy orientovaného grafu. Pokud vrchol nenáleží žádnému shluku, je vytvořen nový shluk a tento vrchol je do něho přiřazen a pokud z něho vede orientovaná hrana na další vrchol, přechází se právě na tento následující vrchol, který může být buď nepřičten do shluku, pak je přiřazen do stejného jako jeho předchůdce, nebo je-li již v existujícím shluku, je pak celý nejnovější shluk přiřazen k tomuto shluku tzn. jednotlivé vrcholy jsou odebrány z nejnovějšího shluku a přiřazeny do shluku, který odpovídá poslednímu vrcholu. Pak se algoritmus vrací k procházení původního seznamu rychlostí kde vyhledá v čase nejstarší rychlost, která není přiřazena žádnému shluku a celý cyklus přiřazování shluku se opakuje.

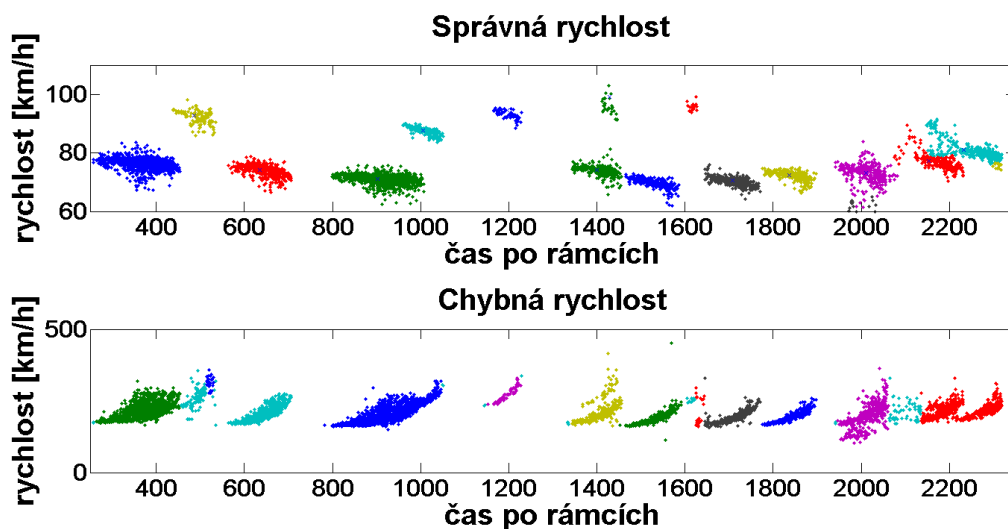
Spojování shluků

Pokud automobil v průběhu projíždění okolo radaru zpomaluje nebo zrychluje, může nastat situace kdy jeden pohybující se objekt je detekován jako dva. Tato situace může nastat pokud není v některém okamžiku zaznamenáno dostatečné množství rychlostí. Algoritmus pak kvůli měnící se rychlosti vnímá skutečný objekt jako dva shluky. Pro eliminaci byla implementována metoda pro nalezení přímek procházejících jednotlivými shluky. Z těchto přímek byla vypočítána směrnice a pokud shluky spolu sousedily, tak byly porovnány jednotlivé směrnice a pokud byly podobné, tak shluky byly spojeny. Metoda pro nalezení přímky ve shlucích byla použita Metoda nejmenších čtverců.

Rozdělování shluků

Rozdělování shluků, je používáno kvůli situacím, kdy se v dosahu radaru pohybuje více objektů se stejnou nebo velice podobnou rychlostí. Problém pro detekci objektů je v tom, že metoda x-means nalezne shluky, skládající se z rychlostí podobné hodnoty, ovšem to jestli se jedná o jedno nebo více automobilů jedoucích stejnou rychlostí s malými rozestupy už nezjistí. Princip rozdělování shluků je postaven na záměrně chybě zvoleném úhlu pro výpočet absolutní rychlosti z rychlosti relativní. Záměrně je cosinusový faktor ovlivňující reálnou rychlost zesilován a tím jsou dostávána data o rychlosti která se v průběhu projíždění automobilu výrazně mění vytváří shluky, které nejsou stabilní v časové ose, ale shluky které jsou orientovány v ose rychlosti. Pokud se metodě x-means předloží seznam takovýchto rychlostí a zároveň se metoda x-means modifikuje tak, aby hledala shluky v ose reprezentující rychlost, pak budou nalezeny odlišné shluky i pro automobily pohybující se stejnou rychlostí. Tento způsob však zase nerozpozná více automobilů pohybujících se ve stejný čas různou rychlostí.

Z výše uvedeného vyplývá, že je vhodné oba dva způsoby hledání shluků zkombinovat a pro primární hledání shluků použít metodu x-means nad reálnými rychlostmi a poté pro kontrolu zda se jedná opravdu o jednotlivé objekty nebo více objektů, metodu x-means nad chybně přepočítanými rychlostmi. Pokud shluk z reálnými rychlostmi obsahuje více shluků s chybnými rychlostmi, pak se daný shluk rozdělí podle chybných rychlostí.



Obrázek 3.10: Ukázka vypočítaných shluků jak pro správné tak chybné rychlosti

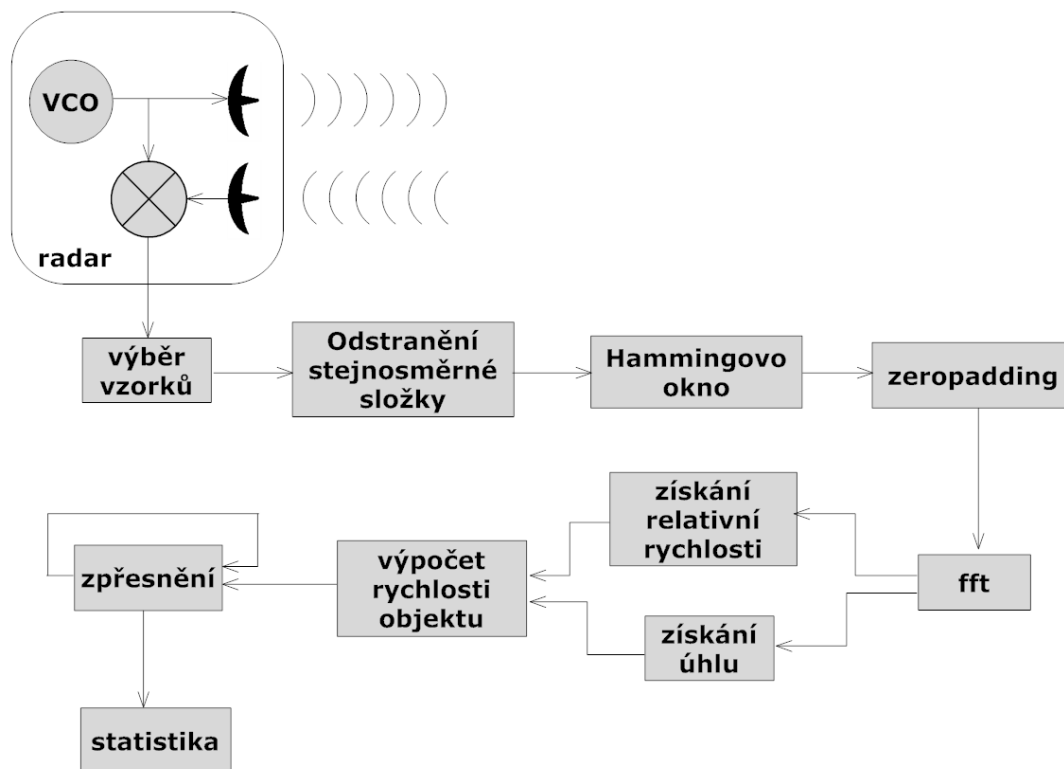
Statistika

Po rozdělení rychlostí do shluků metodou x-means, následným spojením pro případ chybného rozdělení jednoho automobilu do více shluků a případným rozdělením shluku na základě rozpoznání více automobilů v jednom shluku, jsou odstraněny shluky, které obsahují jen jednu nebo velice málo rychlostí. Tyto shluky jsou prohlášeny za šum a dále se nezpracovávají.

Ze zbylých shluků jsou vypočítány průměrné rychlosti a ty uloženy spolu s údaji o čase a směru jízdy automobilu do statistiky. Analyzováním takové statistiky lze zjistit kolik

automobilů projede monitorovaným úsekem a kolik procent řidičů dodržuje maximální povolenou rychlost. Lze generovat skupiny v závislosti na hodnotě o kolik byla maximální povolená rychlost překročena.

Celý návrh programu ilustruje blokové schéma. (obrázek č. 3.11)



Obrázek 3.11: Blokové schéma programu

Kapitola 4

Implementace v C++

V C++ byl implementován algoritmus detekce objektů spolu s výpočtem korekce rychlosti na základě úhlů. K výpočtu Fourierovy transformace byla použita knihovna FFTW.

Vzhledem k tomu, že využití této aplikace je předpokládáno jako vestavěný systém, je dobré se zaměřit na možné optimalizace, aby bylo možné zpracování dat v reálném čase, vždy po zaplnění bufferu, o velikosti jednoho rámce.

Vytvoření konstant

Všechny konstanty je dobré spočítat na začátku programu. Proto všechny vzorce, které byly postupně použity jsou do sebe navzájem dosazeny a rovnice je upravena tak, aby bylo možné neměnné části spočítat na začátku programu. Příklad výpočtu rychlosti:

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c, f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda}, f_d = bin * \frac{f_{vzorkovac}}{N}$$

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c, v_r = v \cos \theta, f_d = bin * \frac{f_{vzorkovac}}{N}$$

$$v_r = \frac{f_d}{2f_t}c, v = \frac{v_r}{\cos \theta}, f_d = bin * \frac{f_{vzorkovac}}{N}$$

$$v = \frac{\frac{bin * f_{vzorkovac}}{N}c}{2f_t \cos \theta}$$

$$v = \frac{v_r}{\cos \theta}, v_r = \frac{bin * f_{vzorkovac}}{2f_t N}c$$

$$v = \frac{v_r}{\cos \theta}, v_r = bin * k_1, k_1 = \frac{f_{vzorkovac}}{2f_t N}c$$

kde N je délka rámce s zeropaddingem.

Konstanta pro výpočet počtu rámců, kdy bude objekt detekován. je založen na

Sloučení předzpracování do jedné funkce

Původně byla pro každý jednotlivý krok předzpracování samostatně vytvořená funkce. Vzhledem k tomu, že se v každém kroku prochází stejné pole dat a to upravuje, bude rychlejší, když se vše sloučí do jedné funkce s jením průchodem daného pole.

Kapitola 5

Závěr

Cílem práce bylo zkoumání a zhodnocení techniky měření rychlosti pod úhlem okolo 45° . Nalezení vhodného algoritmu pro výpočet rychlosti a vytvoření programu, který z radarových dat dokáže zjistit kolik automobilů a jakou rychlostí kolem radaru projelo.

Analyzováním signálů bylo zjištěno, že i na základě velkého úhlu, pod kterým jsou objekty měřeny, je možné vypočítat rychlost. V prostředí Matlab, bylo dosaženo dobrých výsledků při výpočtu rychlosti, pokud se v dosahu radaru, pohyboval pouze jeden automobil v jednom směru. Bylo ověřeno, že rychlost se rovnala rychlosti vypočtené z měření pod menším úhlem. Následně byl implementován algoritmus pro detekci více pohybujících se objektů v dosahu radaru. V rámci ladění a ověřování funkcionality algoritmu, byl algoritmus rozšiřován o skládání, rozdělování a zahazování některých shluků tak, aby na základě výpočtu bylo dosaženo výsledků odpovídajících reálné situaci na silniční komunikaci. Tento algoritmus je velice přesný pro jednoproudové komunikace, v případě že je radar umístěn na víceproudových komunikacích, nemusí být úspěšnost detekce automobilů stoprocentní. Ve velké míře ovlivňuje korektní zpracování dat umístění radaru vůči vozovce, pokud je radar umístěn výše nad vozovkou, nedochází k zákrytům automobilů a data se lépe zpracovávají. V tomto ohledu činí problém kamiony, které mohou automobily zastínit a tím pádem přerušit jejich detekci, v takovém případě jsou pak detekovány místo jednoho automobilu automobily dva.

Celkově tato práce ověřila funkčnost měření rychlosti radarem pod úhlem a dokázala, že lze detekovat pohybující se automobily pouze radarem bez použití kamery.

Zjištěné výhody měřením pod úhlem jsou, že můžeme určit úhel pro korekci rychlosti. V případě měření pod malým úhlem nejsme schopni určit, zda se mikrovlna odrazila od masky, čelního skla nebo boku auta. Výhodou také může být, že radar snímá méně vozovky, a proto nedochází ke zkreslení pomocí odrazů z dálky. Na druhou stranu, pokud je radar umístěn na pozici, která umožňuje, aby se mikrovlny odrazily po projití nad komunikací zpět nad komunikaci, tato výhoda přestává platit a spíše se stává nevýhodou. Nevýhodou je, že musí být určen přesně úhel, pod kterým probíhá měření.

Literatura

- [1] DUDÁČEK, L.: *Radarové měření vzdálenosti*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [2] GmbH, R. M.: *K-MC4 Monopulse Radar Transceiver*. 2013.
- [3] KOČÍ, A. a.: *Nové universum: Všeobecná encyklopedie*. Blanská Bystrica: Tisk Tlačiarne BB, první vydání, 2003, 238 s., iISBN: 80-242-1069-X.
- [4] MAHAFZA, B. R.: *Radar Systems Analzsis and Design Using MATLAB*. Chapman & Hall/CRC, 2000, iISBN: 1-58488-182-8.
- [5] MAHAFZA, B. R.: *Radar Systems Analzsis and Design Using MATLAB*. Chapman & Hall/CRC, 2000, 143 s., iISBN: 1-58488-182-8.
- [6] MARŠÍK, L.: *Accelerated and Embedded Radar Signal Processing Algorithms*. diploma thesis, FIT VUT Brno, 2012.
- [7] RYCHARDS, M. A.: *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, první vydání, 2005, 1 s., iISBN: 978-0-07-144474-3.
- [8] RYCHARDS, M. A.: *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, první vydání, 2005, 20 s., iISBN: 978-0-07-144474-3.
- [9] SKOLNIK, M. I.: *Inrtoduction to radar system*. New York: McGraw-Hill, třetí vydání, 2001, 105 s., iISBN: 0-07-288138-0.
- [10] SKOLNIK, M. I.: *Inrtoduction to radar system*. New York: McGraw-Hill, třetí vydání, 2001, 138 s., iISBN: 0-07-288138-0.
- [11] Wikipedie: Dopplerův jev [online]. [cit. 2015-01-15].
URL http://cs.wikipedia.org/wiki/Doppler%C5%AFv_jev
- [12] Wikipedie: Elektromagnetické vlny [online]. [cit. 2015-01-15].
URL http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_vlny
- [13] ČERNOCKÝ, J.: *Analýza řečových signálů: studijní opora*. FIT VUT Brno, 2006.
- [14] ŽALUD, V.: *Moderní radioelektronika*. BEN - technická literatura, první vydání, 2000, 20 s., iISBN: 80-86056-47-3.
- [15] ŽALUD, V.: *Moderní radioelektronika*. BEN - technická literatura, první vydání, 2000, iISBN: 80-86056-47-3.

Přílohy

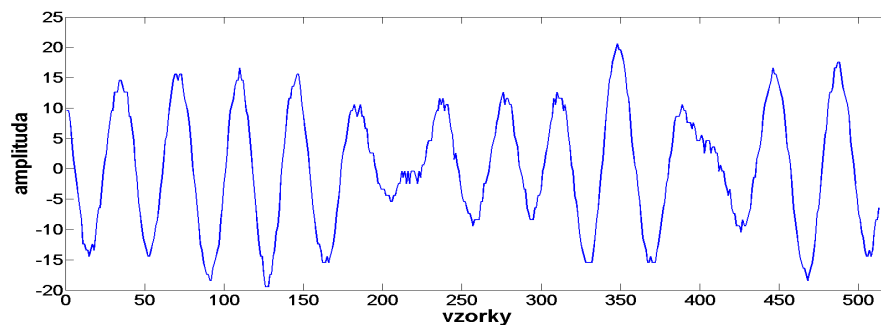
Seznam příloh

A Ukázky grafů, znázorňujících postupné zpracování radarového signálu	32
B Grafy srovnávající použití zeropaddingu	34
B.1 Zeropadding pro 512 vzorků	35
B.2 Zeropadding pro 256 vzorků	36

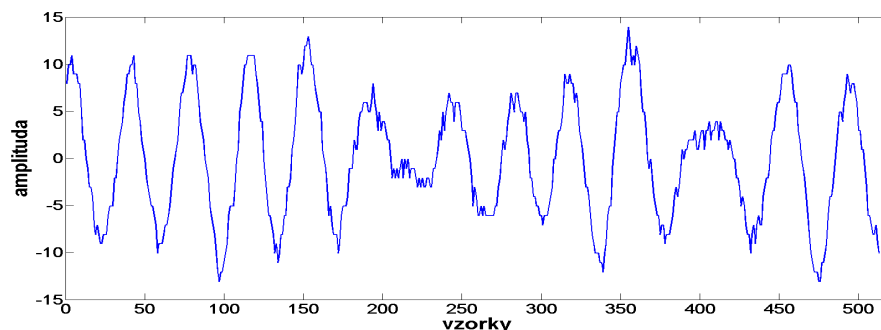
Příloha A

Ukázky grafů, znázorňujících postupné zpracování radarového signálu

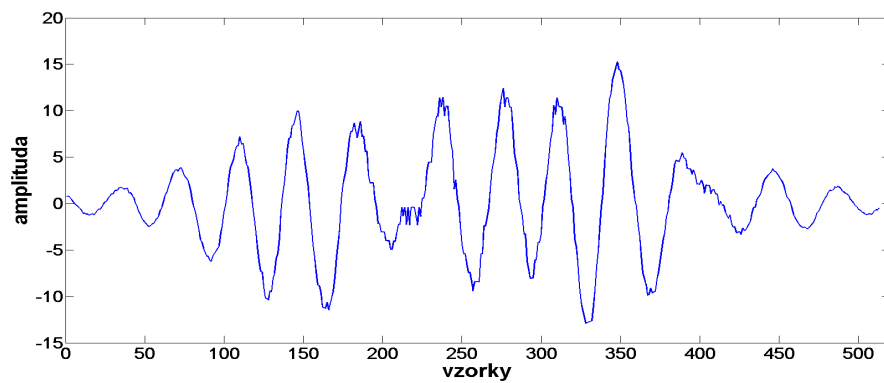
V této příloze jsou grafy, které ukazují změny signálu při jeho úpravách v rozsahu jednoho rámece. Nejprve je od signálu odečtena stejnosměrná složka, poté je celý rámec vynásoben Hammingovou funkcí a poté následuje spojení obou komplexních složek do jednoho signálu, který se používá pro výpočet frekvenčního spektra za použití metody FFT.



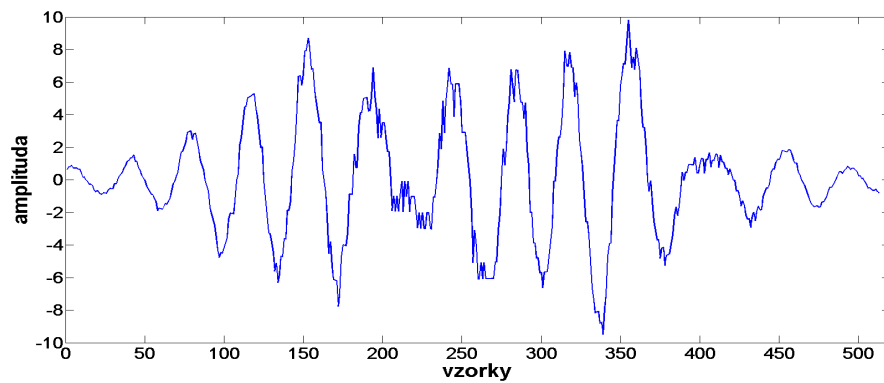
Obrázek A.1: Reálná část radarového signálu



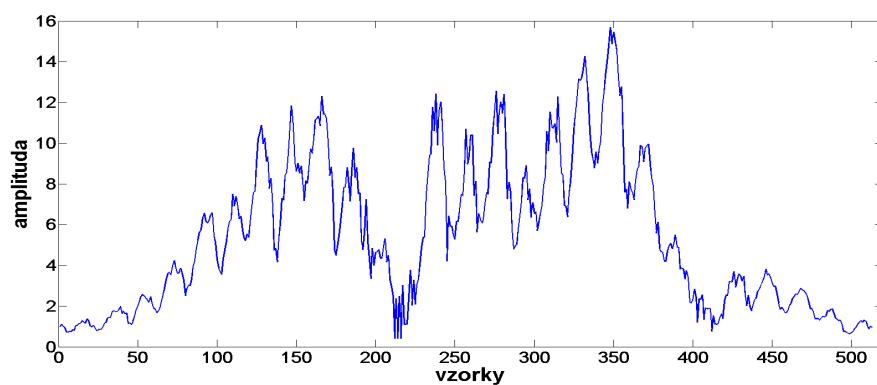
Obrázek A.2: Imaginární část radarového signálu



Obrázek A.3: Reálná část signálu vynásobená Hammingovou funkcí



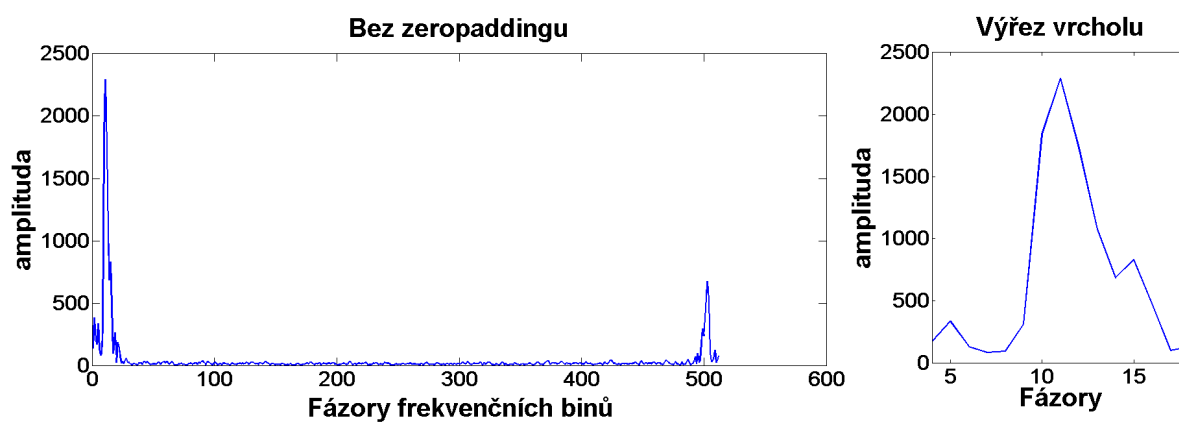
Obrázek A.4: Imaginární část signálu vynásobená Hammingovou funkcí



Obrázek A.5: Absolutní hodnota komplexního signálu

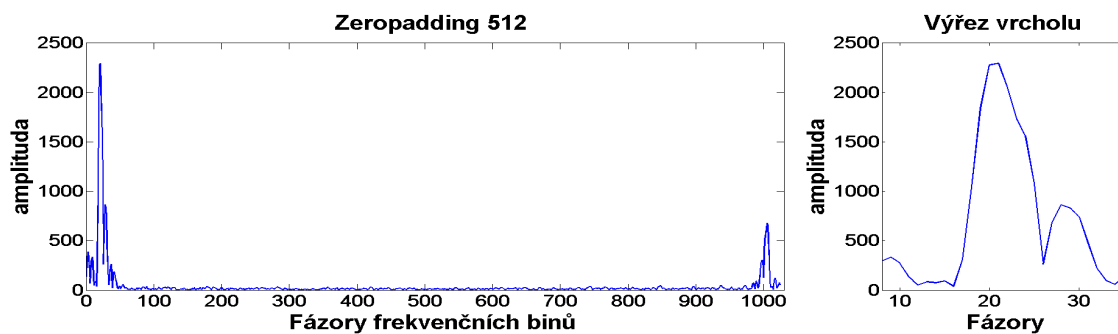
Příloha B

Grafy srovnávající použití zeropaddingu

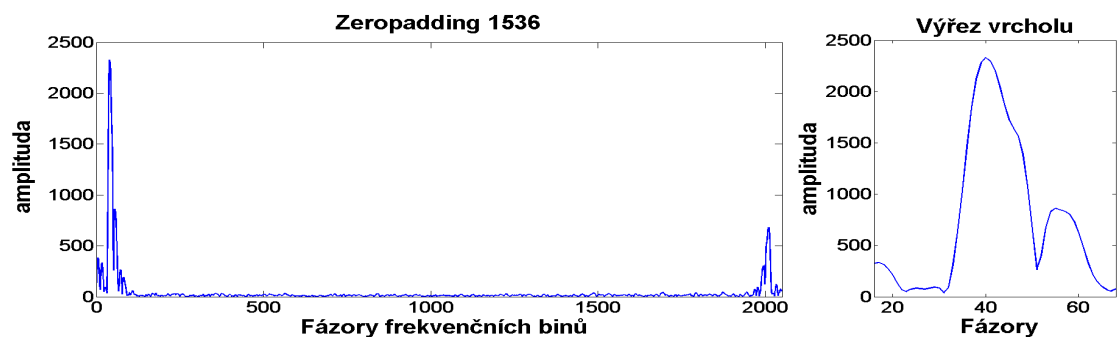


Obrázek B.1: Výpočet FFT bez použití zeropaddingu

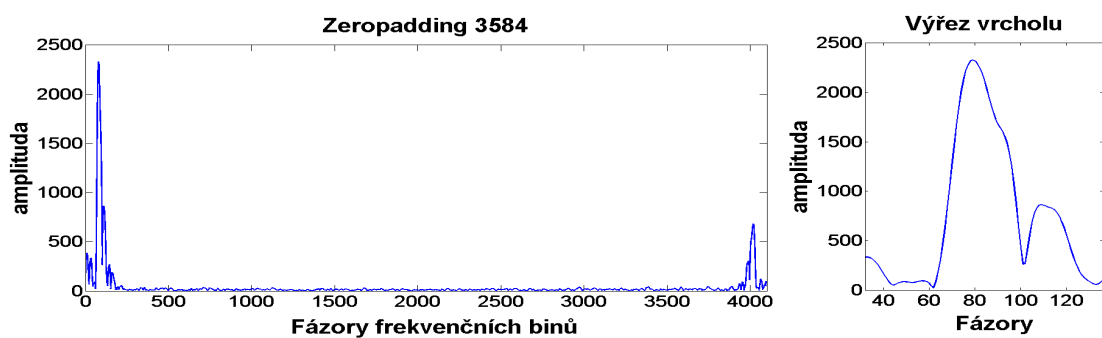
B.1 Zeropadding pro 512 vzorků



Obrázek B.2: Výpočet FFT s použitím zeropaddingu 512

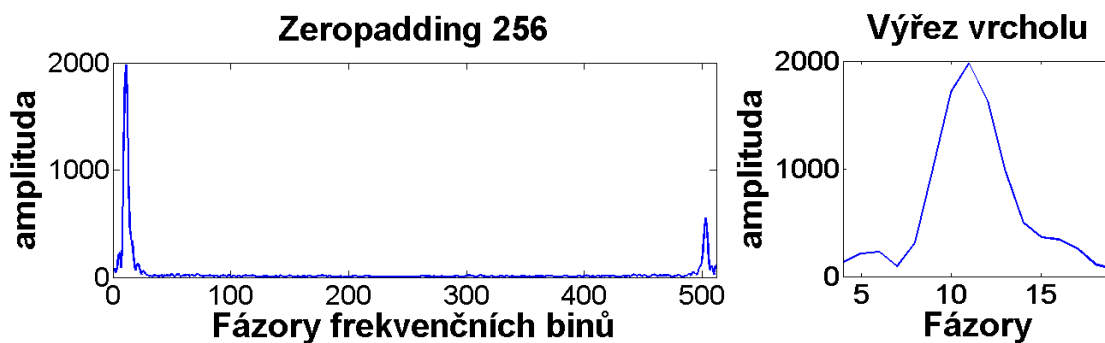


Obrázek B.3: Výpočet FFT s použitím zeropaddingu 1536

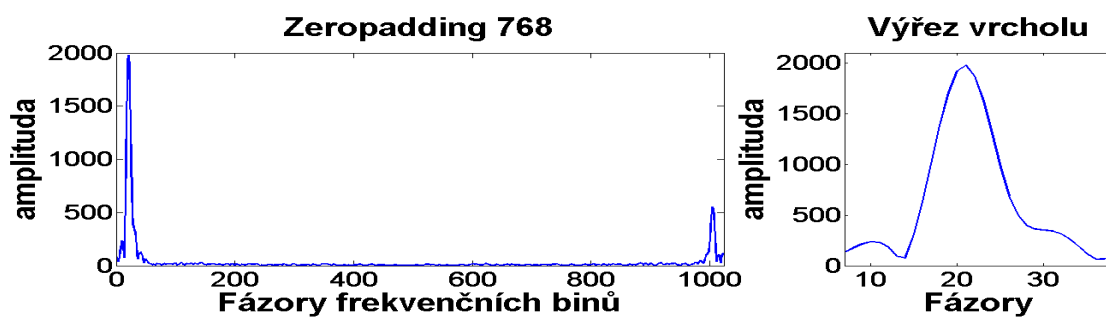


Obrázek B.4: Výpočet FFT s použitím zeropaddingu 3584

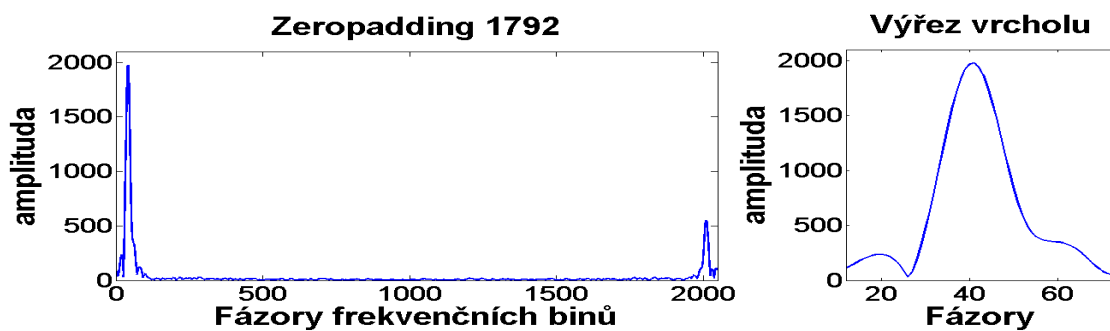
B.2 Zeropadding pro 256 vzorků



Obrázek B.5: Výpočet FFT s použitím zeropaddingu 256



Obrázek B.6: Výpočet FFT s použitím zeropaddingu 768



Obrázek B.7: Výpočet FFT s použitím zeropaddingu 1792